



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

MODULÁRNÍ NAPĚŤOVÝ ZDROJ PRO PROJEKT STUDENTSKÉ FORMULE

MODULAR POWER SUPPLY FOR FORMULA STUDENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Samuel Ščípa

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Pavlík, Ph.D.

BRNO 2021

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

Student: Samuel Ščípa

ID: 211240

Ročník: 3

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Modulární napěťový zdroj pro projekt studentské formule

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte problematiku zvyšujících spínaných měničů. Na základě získaných informací navrhnete obvod měniče a následně vytvořte jeho model. Na základě studia chování měniče v simulaci navrhnete kompenzační parametry a vytvořte prototyp modulu napěťového zdroje.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 3.6.2021

Vedoucí práce: Ing. Michal Pavlík, Ph.D.

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Táto bakalárska práca je zameraná na teoretický rozbor a návrh napäťového spínaného zdroja s galvanickým oddelením. Realizácia návrhu je vo forme výkonovej a regulačnej časti modulárneho zdroja. Parametre zariadenia sú prispôsobené potrebám a požiadavkám do vývojového pracoviska študentskej elektrickej formuly. Navrhnutá konfigurácia dosahuje maximálne výstupné napätie 1000 V a prúd 100 mA, ktoré sú užívateľsky regulovateľné.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ

Spínaný zdroj, SMPS, transformátor, PWM, jednočinný priepustný menič, usmerňovač, vstupný filter, výstupný filter, moduly, modulárny, 1000 V, mikrokontrolér, digitálne ovládanie, TU Brno Racing, Formula Študent.

ABSTRACT

This bachelor thesis is focused on the theoretical analysis and design of switching power supply with galvanic isolation. The implementation of the design is in the form of the power and control part of the modular power supply. The device parameters are suited for the needs and requirements of the development department of the electric student formula. Design configuration achieves a maximum output voltage of 1000 V and a current of 100 mA, which are user-adjustable.

KEYWORDS

Switch mode power supply, SMPS, transformer, PWM, forward converter, rectifier, input filter, output filter, modules, modular, 1000 V, microcontroller, digital control, TU Brno Racing, Formula Student.

SAMUEL, Ščípa. *Modulární napěťový zdroj pro projekt studentské formule*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2021, 83 s. Bakalárska práca. Vedúci práce: Ing. Michal Pavlík, Ph.D.

Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko autora: Ščípa Samuel
VUT ID autora: 211240
Typ práce: Bakalárska práca
Akademický rok: 2020/21
Téma závěrečnéj práce: Modulární napěťový zdroj pro projekt studentské formule

Vyhlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúcej/ceho záverečnej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúceho autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno
.....
podpis autora*

*Autor podpisuje iba v tlačenej verzii.

POĎAKOVANIE

Týmto by som rád poďakoval vedúcemu bakalárskej práce pánovi Ing. Michalovi Pavlíkovi, Ph.D., za odborné vedenie a konzultácie k bakalárskej práci. Ďalej ďakujem svojim rodičom a priateľom za trpezlivosť a podporu, a taktiež celému tímu TU Brno Racing za rady a ochotu pri tvorbe práce.

Obsah

Úvod	12
1 Napájacie zdroje	13
1.1 Spínané zdroje	13
1.2 Galvanicky oddelené meniče	14
1.2.1 Blokujúci menič	14
1.2.2 Jednočinný priepustný menič	16
1.2.3 Dvojčinný priepustný menič	17
1.3 Sieťové napájanie	18
1.4 Rušenie a filtrácia	21
1.5 Transformátor	24
1.6 Spätnoväzbová regulácia	28
2 Návrh zariadenia	31
2.1 Dimenzovanie sieťového napájania	32
2.2 Návrh filtrov a ochrana pred rušením	33
2.2.1 Návrh výstupného filtračného induktora	34
2.2.2 Návrh výstupného filtračného kondenzátora	35
2.3 Návrh transformátora	35
2.4 Dimenzovanie spínacieho tranzistora	38
2.5 Výpočet výkonových strát	43
2.5.1 Straty na tranzistore	43
2.5.2 Straty usmerňovacích diód	43
2.6 Izolácia	44
2.7 Návrh regulačného obvodu	45
2.7.1 Simulácia regulácie	46
2.7.2 Napäťová regulácia	50
2.7.3 Prúdová regulácia	51
2.7.4 Ovládanie tranzistora	51
3 Realizácia zariadenia	53
3.1 Návrh a výroba DPS	54
3.2 Segmenty zariadenia	54
3.2.1 Výkonový modul	54
3.2.2 Riadiaci modul	55
3.2.3 Výstupný modul	56
3.3 Prototyp zariadenia	57

Záver	59
Literatúra	60
Zoznam symbolov a skratiek	63
Zoznam príloh	68
A Výkonový modul	69
B Riadiaci modul	74
C Výstupný modul	81

Zoznam obrázkov

1.1	Bloková schéma spínaných zdrojov	13
1.2	Schematické zapojenie blokujúceho meniča	15
1.3	Schematické zapojenie jednočinného priepustného meniča	16
1.4	Schematické zapojenie dvojčinného priepustného meniča	17
1.5	Schematické zapojenie usmerňovača	19
1.6	Vstupné napätie a prúd SMPS bez použitia PFC	21
1.7	Vstupné napätie a prúd SMPS s použitím PFC	21
1.8	Princíp šírenia diferenčného šumu	22
1.9	Princíp šírenia súhlasného šumu	23
1.10	Zapojenie EMI filtra	24
1.11	Schematické zapojenie diferenčného filtra	24
1.12	Vyobrazenie stavby transformátora	25
1.13	Bloková schéma regulačnej časti výkonového obvodu	29
2.1	Bloková schéma konceptu a zapojenia modulárneho zdroja	31
2.2	Fotografia modulu EMI filtra	34
2.3	Fotografia jadra transformátora s príslušenstvom	38
2.4	Typické zapojenie R a C na potlačenie napäťových prechytov	40
2.5	Priebeh oscilačnej frekvencie f_0	41
2.6	Priebeh oscilačnej frekvencie f_1	41
2.7	Blokový diagram izolačného kanálu	45
2.8	Blokové vyobrazenie zapojenia regulácie a ovládania výkonového modulu	46
2.9	Blokové vyobrazenie regulačného obvodu zariadenia	47
2.10	Zhotovenie regulátora z fyzických súčiastok	48
2.11	Simulačná schéma regulácie v spojitom režime	49
2.12	Priebeh časovej analýzy ustálenia výstupu na základe aktívnej regulácie	49
2.13	Zapojenie napäťovej regulácie	50
2.14	Zapojenie prúdovej regulácie	51
2.15	Zapojenie ovládacieho obvodu spínacieho prvku	52
3.1	LCD displej s grafickým užívateľským rozhraním - menu	53
3.2	LCD displej s grafickým užívateľským rozhraním - zdroj	53
3.3	Grafické vyobrazenie návrhu výkonového modulu	55
3.4	Grafické vyobrazenie návrhu riadiaceho modulu	55
3.5	Grafické vyobrazenie návrhu výstupného modulu	56
3.6	Grafické vyobrazenie vnútorného usporiadania 3D modelu zariadenia	57
3.7	Grafické vyobrazenie 3D modelu zariadenia z prednej strany	58
3.8	Grafické vyobrazenie 3D modelu zariadenia zo zadnej strany	58
A.1	Pohľad na hornú vrstvu výkonového modulu	73

A.2	Pohľad na spodnú vrstvu výkonového modulu	73
B.1	Pohľad na hornú vrstvu riadiaceho modulu	80
B.2	Pohľad na spodnú vrstvu riadiaceho modulu	80
C.1	Pohľad na hornú vrstvu výstupného modulu	83
C.2	Pohľad na spodnú vrstvu výstupného modulu	83

Zoznam tabuliek

1.1	Prehľad základných parametrov transformátora	26
2.1	Cieľové parametre navrhovaného laboratórneho zdroja	32
2.2	Parametre potrebné pre návrh transformátora	36
2.3	Parametre jadra transformátora	36
2.4	Významné parametre zvoleného spínacieho tranzistora	39
A.1	Zoznam použitých súčiastok v návrhu DPS výkonového modulu	69
A.2	Pokračovanie zoznamu použitých súčiastok v návrhu DPS výkonového modulu	70
B.1	Zoznam použitých súčiastok v návrhu DPS riadiaceho modulu	74
B.2	Pokračovanie zoznamu použitých súčiastok v návrhu DPS riadiaceho modulu	75
C.1	Zoznam použitých súčiastok v návrhu DPS výstupného modulu	81

Úvod

V rámci študentského spolku **TU Brno Racing**, zapojeného do projektu *Formula Student*, je nutnosť správneho vybavenia na pracovisku, a preto sa táto práca zameriava na návrh a výrobu laboratórneho zdroja, ktorý vyhovuje špecifickým potrebám pri vývoji a stavbe elektrickej formuly. Laboratórium alebo technologické pracovisko vo všeobecnosti musí byť vždy vybavené množstvom rôznych špecifických prístrojov a zariadení pre efektívnu tvorbu a návrh elektronických prototypov.

Súťaž Formula Študent, ktorej sa zúčastňuje aj tento študentský spolok, je európskou odnožou pôvodne amerického vzdelávacieho projektu Formula SAE (Society of Automotive Engineers). Táto inžinierska súťaž bola založená už v roku 1981 a vznikla s jediným účelom - pripraviť budúcich inžinierov lepšie na prax. Koncept je založený na fungovaní fiktívnej firmy. Táto firma má za cieľ vývoj malého jednomiestneho vozidla formulového typu. Celý proces, ktorým každoročne tímy prechádzajú, zahŕňa návrh, výrobu prototypu, testovanie, analýzu nákladov, prípravu marketingového plánu a závodenie. Okrem toho je dôležité predať znalosti a skúsenosti z jednej sezóny na druhú novým členom tímu. Do tohoto projektu je zapojených takmer 800 univerzitných tímov z celého sveta.[2]

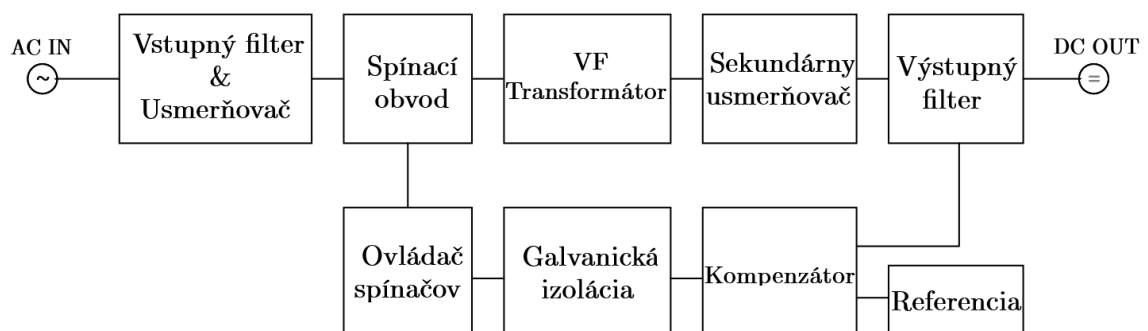
Problematica rozoberaná v tejto práci je zameraná na návrh, simuláciu a realizáciu laboratórneho spínaného zdroja modulového typu, ovládaného mikrokontrolérom, so špecifickými parametrami a funkciami vyhovujúcimi pre potreby napájania a testovania elektrických zariadení určených na elektrickú formulu. Navrhovaný laboratórny zdroj je špecifický svojou možnosťou regulácie výstupného napätia a voľbou maximálneho výstupného napätia vďaka modulárnemu prevedeniu a regulácie odoberaného prúdu v rádoch miliampérov.

1 Napájacie zdroje

Napájacie zdroje sú zariadenia, ktoré dodávajú elektrickú energiu do elektrickej záťaže. Zdrojom energie je najčastejšie elektrická rozvodná sieť. Existujú však situácie, kde zdrojom energie sú zariadenia na ukladanie energie (napr. batérie alebo palivové články), či priame zdroje energie (napr. generátory, alternátory alebo solárne konvertory). Najčastejšie sú však napájané z jednofázovej distribučnej siete nízkeho napätia (v EU: 230 V/50 Hz). Ich hlavný význam je poskytovať na svojom výstupe stabilizované striedavé alebo jednosmerné napätie. Medzi funkcie, ktoré môžu napájacie zdroje vykonávať, sú napríklad: obmedzovanie prúdu odoberaného záťažou na bezpečnú úroveň, odpojenie záťaže v prípade elektrickej poruchy, izolácia, filtrácia a stabilizácia napájania na zabránenie elektronického šumu na vstupe do záťaže. Dôležitou súčasťou napájacieho zdroja je korekcia účinníku na zabezpečenie odoberania reálnej energie zo siete.

1.1 Spínané zdroje

Spínané zdroje, označované ako SMPS (*angl. switched mode power supply*), sú taktiež nazývané aj ako jednosmerné pulzné meniče. Táto práca sa zameriava na pulzné meniče výhradne s pulzným vysokofrekvenčným (VF) transformátorom. Ich hlavnou výhodou oproti lineárnym zdrojom je, že na rozdiel od lineárnych zdrojov, kde sa energia mení v teplo, tak u spínaných zdrojov sa docieli zníženie napätia pulznou šírkovou moduláciou a integráciou. V pulznom režime môže byť odoberaný pulzný výkon podstatne väčší, ako je možné odoberať v lineárnych režimoch. Spínané zdroje majú veľké množstvo prevedení. Ich skladba ja závislá na využití, potrebe a požiadavkách spotrebiteľa.



Obr. 1.1: Bloková schéma spínaných zdrojov

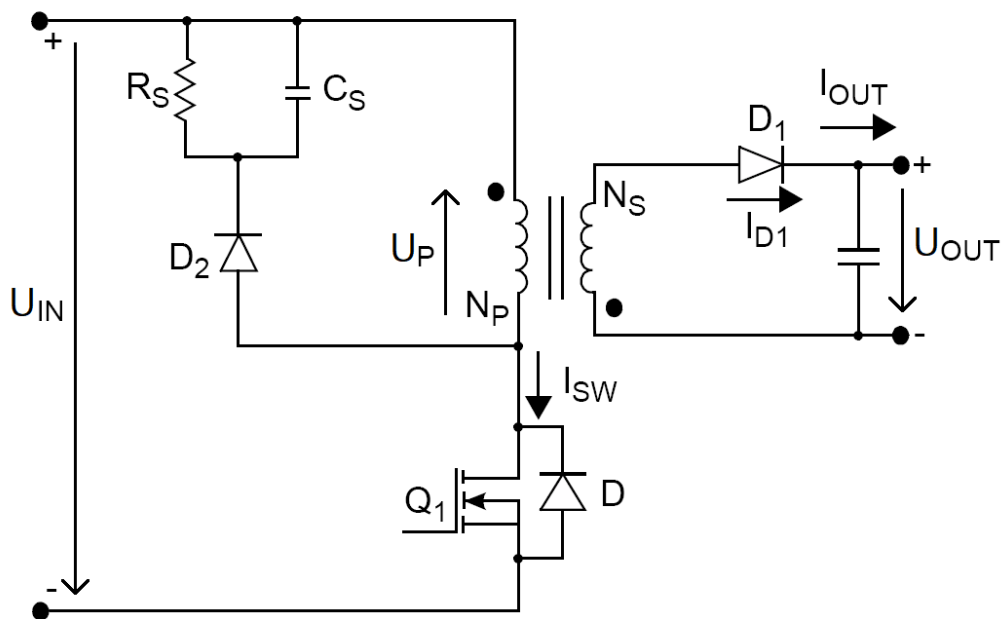
Na obr. 1.1 je vyobrazená zjednodušená bloková schéma zapojenia bežného spínaného zdroja s transformátorom. Vstupný filter je dôležitým stavebným blokom na vstupe každého zdroja pripojovaného do rozvodnej siete. Takýto filter má za úlohu zamedziť ďalšiemu šíreniu sieťového rušenia do a aj zo zariadenia. Po odfiltrovaní a dosiahnutí tohto vyhladeného striedavého napätia je následne usmernené pomocou usmerňovača a vyhladené pomocou zberného kondenzátora. Toto napätie je vysokofrekvenčným spínaním tranzistora premenené na obdĺžnikový priebeh, teda aj striedavý prúd, ktorý vytvára magnetický tok prúdiaci jadrom do sekundárneho vinutia a na základe Faradayovho indukčného zákona sa indukuje elektrické napätie. Toto napätie je opäť usmernené s cieľom potlačiť striedavé AC (*angl. alternating current*, ďalej AC) zložky vzniknuté zo spínacích javov a pomocou výstupného filtra je napätie vyhladené a môže byť privedené do záťaže. Na záver sa nesmie zabudnúť na spätnoväzbovú reguláciu zloženú z kompenzácie a referenčného napätia, vďaka ktorej riadiace prvky regulujú striedu spínacieho signálu spínaných prvkov a zároveň menia hodnotu výstupného napätia podľa potreby.[3]

1.2 Galvanicky oddelené meniče

V praxi je častou potrebou efektívne premieňať vstupné napájacie napätie na rôzne hodnoty výstupného napätia. Tento jav sa vykonáva za pomoci meničov elektrického napätia. Meniče možno rozdeliť do dvoch veľkých skupín, a to na galvanicky oddelené (izolované) meniče alebo neizolované meniče. Existujú zvyšujúce, znižujúce, priepustné a mnohé ďalšie, ktoré z hľadiska zamerania práce nie sú relevantné. V tejto časti textu sa výhradne píše o galvanicky oddelených meničoch za pomoci transformátora, z dôvodu vyššej bezpečnosti pri vyšších napätiach a väčšej výkonovej flexibility.

1.2.1 Blokujúci menič

Blokujúci menič (*angl. flyback converter*, ďalej flyback) (Obr. 1.2), je izolovaný menič, založený na modifikovanej topológii zvyšujúceho a znižujúceho meniča. Jeho najväčšou výhodou je, že nepotrebuje extra induktor na ukladanie energie oproti iným topológiám, pretože izolačný transformátor slúži aj ako ukladací induktor. Tento fakt umožňuje zníženie celkovej ceny meniča, avšak pri aplikáciách s vyššími prúdmi je kvôli tomuto menej použiteľný.



Obr. 1.2: Schematické zapojenie blokujúceho meniča (Prevzaté z: [5])

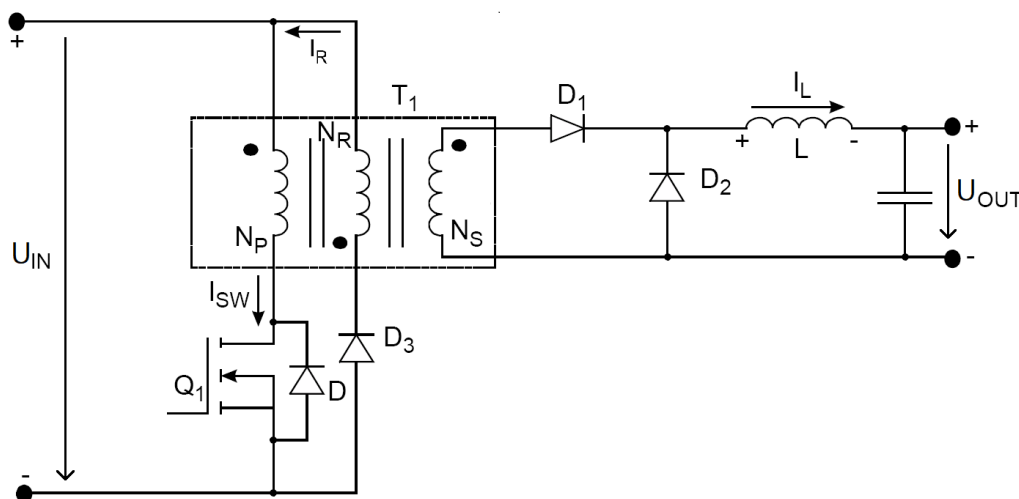
V blokujúcom meniči je zapojený spínač Q_1 v sérii s primárnym vinutím transformátora. Transformátor slúži na ukladanie energie počas doby zapnutia Q_1 a poskytuje izoláciu medzi vstupným napätím U_{IN} a výstupným napätím U_{OUT} . V prevádzkovom stave, keď je spínač Q_1 v zapnutej polohe, počas periódy T_{ON} , prechádza prúd vinutím transformátora. Počas T_{ON} periódy sa dióda D_1 nachádza v nepriepustnom režime a transformátor sa chová ako induktor. Z dôvodu nepriepustného režimu diódy D_1 , dôjde k toku prúdu (I_{OUT}) z výstupného kondenzátora do záťaže. Hodnota výstupného kondenzátora by mala byť dostatočne veľká na dodanie stabilného prúdu do záťaže počas periódy T_{ON} . Na konci periódy T_{ON} , keď prejde spínač do vypnutého stavu (T_{OFF}), energia uložená v primárnom vinutí transformátora sa prenáša na sekundárne. Táto uložená energia dodáva energiu do záťaže a nabíja výstupný kondenzátor.[5]

$$\frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = \left(\frac{N_S}{N_P} \right) \left(\frac{s}{1-s} \right) \quad (1.1)$$

Rovnica 1.1 vyjadruje vzájomný vzťah medzi vstupným (U_{IN}) a výstupným (U_{OUT}) napätím a striedou (s). Táto rovnica a vzájomný vzťah veličín platí aj pri neizolovanom znižujúcom meniči.

1.2.2 Jednočinný priepustný menič

Jednočinný priepustný menič (*angl. forward converter*, ďalej forward) (Obr. 1.3), je taktiež izolovaný menič s podobnou topológiou a efektívnosťou ako pri blokujúcom meniči. Nevýhodou forward topológie je potreba samostatného induktora na výstupnej strane obvodu. Vďaka demagnetizačnému vinutiu (N_R) si obvod „ušetrí“ jeden tranzistor oproti klasickému jednočinnému priepustnému meniču, kde sú dva.



Obr. 1.3: Schematické zapojenie jednočinného priepustného meniča s demagnetizačným vinutím (Prevzaté z: [5])

V jednočinnom priepustnom meniči je zapojený spínač (Q_1) v sérii s primárnym vinutím (N_P) transformátora, ktorý vytvára pulzné napätie. Transformátor slúži na zníženie hodnoty vstupného napätia a jeho prenesenie na sekundárne vinutie, a taktiež, ako aj u ostatných izolovaných meničov, plní funkciu galvanickej izolácie medzi U_{IN} a U_{OUT} . V ustálenom stave prevádzky, keď je Q_1 zapnutý, počas periódy T_{ON} prechádza prúd vinutím (N_P) transformátora. Na sekundárnej strane (N_S) transformátora je dióda D_1 v priepustnom a diódy D_2 a D_3 sú v nepriepustnom režime. Po privedení vstupného napätia na primárne vinutie (N_P) sa transformuje na sekundárne (N_S) a napätie na dióde D_2 sa rovná vstupnému napätiu vynásobenému pomerom vinutí transformátora (N_S / N_P). [5]

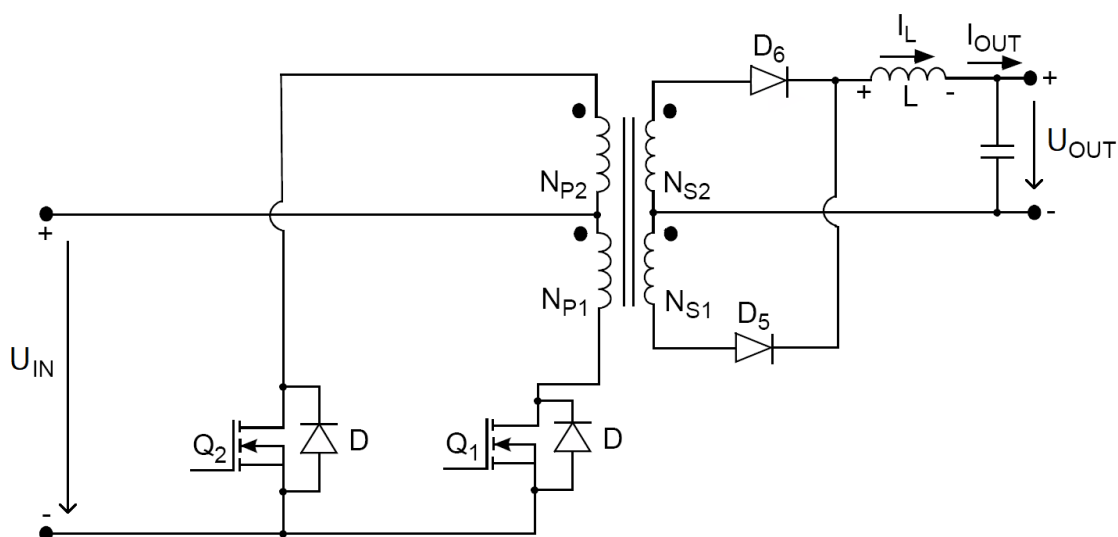
$$U_L = U_{IN} \frac{N_S}{N_P} - U_{OUT} \quad (1.2)$$

$$U_{OUT} = U_{IN} \left(\frac{N_S}{N_P} \right) s \quad (1.3)$$

V tomto prípade napätie, privedené na induktor (U_L) v priepustnom smere v čase T_{ON} , je dané rovnicou 1.2, ktorá platí pri zanedbaní strát transformátora a napäťového poklesu diódy v priepustnom režime. Rovnica 1.3 vyjadruje vzájomný vzťah medzi vstupným (U_{IN}) a výstupným (U_{OUT}) napätím a striedou (s).

1.2.3 Dvojčinný priepustný menič

Dvojčinný priepustný menič (*angl. push-pull converter*, ďalej push-pull) (Obr. 1.4), je taktiež izolovaný menič založený na modifikovanej topológii jednočinného priepustného meniča, avšak s dvojitým primárnym vinutím transformátora (v tomto prípade aj sekundárnym), sa využíva viacej materiálu na jadro, ale z hľadiska zvlnenia výstupného napätia je viac efektívnejší ako pri forward a flyback topológiách.



Obr. 1.4: Schematické zapojenie dvojčinného priepustného meniča (Prevzaté z: [5])

Princíp fungovania obvodu je založený na spínaní záporného pólu vstupného jednosmerného prúdu, privedeného medzi dve primárne vinutia transformátora, pomocou spínačov Q_1 a Q_2 počas jednotlivých pol-cyklov periódy. Tieto spínače vytvárajú pulzujúce napätie na primárnom vinutí transformátora. Transformátor slúži na zníženie primárneho napätia a zabezpečuje galvanickú izoláciu medzi vstupným a výstupným napätím. Transformátor použitý v push-pull topológii sa skladá z dvoch stredom napájaných, primárnych a sekundárnych vinutí. Spínače Q_1 a Q_2 sú poháňané riadiacim obvodom, ktorý zabezpečuje ich vzájomne opačný chod. V ustálenom stave prevádzky, keď je Q_1 zapnutý, počas periódy T_{ON} prechádza prúd vinutím N_{P1} transformátora a to spôsobí, že dióda D_5 sa nachádza v nepriepustnom režime a dióda

D_6 v priepustnom režime. Vďaka tomu dióda D_6 umožňuje tok prúdu induktora I_L zo sekundárneho vinutia N_{S2} na výstup. Na konci periódy T_{ON} prejde spínač Q_1 do vypnutého stavu a zostane vypnutý po zvyšok spínacej periódy (T_S). Po prejdení mŕtvej zóny (oba spínače Q_1 a Q_2 sú vypnuté), ktorá slúži na zamedzenie simultánneho spínania oboch spínačov, dôjde k zapnutiu spínača Q_2 a prúd začne tiecť vinutím N_{P2} počas celej druhej polovice spínacej periódy (T_S). To spôsobí, že dióda výstupného usmerňovača D_5 prejde do priepustného režimu a umožní tok prúdu induktora I_L cez sekundárne vinutie N_{S1} . Tento cyklus vedie k striedaniu kladného a záporného napätia na sekundárnych vinutiach transformátora za predpokladu, že obidve sekundárne vinutia N_{S1} a N_{S2} majú rovnaký počet závitov.[5]

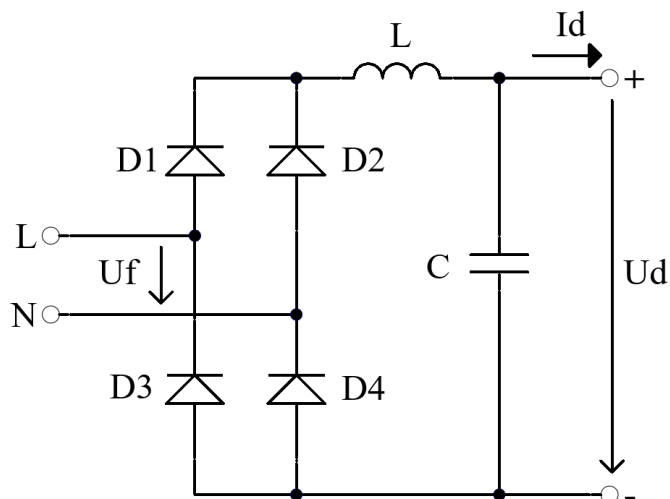
$$U_{OUT} = U_{IN} \left(\frac{N_S}{N_P} \right) 2s \quad (1.4)$$

$$s = \frac{T_{ON}}{T_S} \quad (1.5)$$

Rovnice vyjadrujú vzájomný vzťah medzi vstupným (U_{IN}) a výstupným (U_{OUT}) napätím (1.4) a vzťah pre určenie striedy (s) (1.5), kde T_{ON} je doba zapnutého režimu a T_{OFF} je doba vypnutého režimu .

1.3 Sieťové napájanie

Základom získania energie zo sieťového napájania je správny napájací obvod. Ten pozostáva zo vstupného filtra a usmerňovača, ktorý premieňa striedavé napätie (AC) a prúd na jednosmerné (DC) a takto upravené napätie je následne privedené na vstup meniča. Usmerňovače sa najčastejšie vyskytujú pre jednofázové siete (1 x 230 V) v zapojení ako dvojcestný usmerňovač (Graetzov mostík) (obr. 1.5). Spolu s dostatočne výkonným zbieracím kondenzátorom (aj v prevedení ako LC-filter), je toto zapojenie označované ako špičkový detektor (*angl. peak detector*), pretože výstupné napätie dosahuje až takmer 325 V (nabíjacia úroveň kondenzátora), čo je usmernené maximálne napätie. Pri trojfázových sústavách už výstupné napätie dosahuje až 566 V, ideálnych na vysoko výkonové aplikácie, avšak táto práca sa s takými veľkými výkonmi nezaobrá.[1]



Obr. 1.5: Schematické zapojenie jednofázového usmerňovača s LC-filtrom

Dvojcestný usmerňovač je zložený zo štyroch diód a zberného kondenzátora, ktorý taktiež býva doplnený o induktor, spolu tvoriaci LC-filter. Tento kondenzátor sa nabíja v určitom čase na maximálnu hodnotu fázového napätia U_a cez diódy v priepustnom režime. Následne na to, počas vybíjacej doby kondenzátora (Δt), kde sú diódy v nepriepustnom režime, sa stáva zdrojom prúdu (I_d) do záťaže a tento cyklus sa neustále opakuje každú periódu T .

$$U_a = \sqrt{2}U_f \quad (1.6)$$

$$U_d = U_a \frac{q}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{q}\right) \quad (1.7)$$

Vzťah maximálnej hodnoty vstupného fázového napätia U_a a efektívnej hodnoty vstupného fázového napätia U_f je vo vzťahu 1.6. Na získanie hodnoty výstupného napätia U_d sa používa vzorec 1.7, kde q je počet polvln (v 1-fázovom usmerňovači sú to dve). Pre určenie kapacity zberného kondenzátora C platí vzorec 1.8, kde ΔU je pokles napätia na kondenzátore (zvyčajne stanovená hodnota) a Δt je doba vybíjania kondenzátora, ktorá sa určí výpočtom pomocou rovnice 1.9.

$$C = I_d \frac{\Delta t}{\Delta U} \quad (1.8)$$

$$\Delta t = \frac{T}{2} \left[1 - \frac{1}{\pi} \arccos\left(1 - \frac{\Delta U}{U_d}\right) \right] \quad (1.9)$$

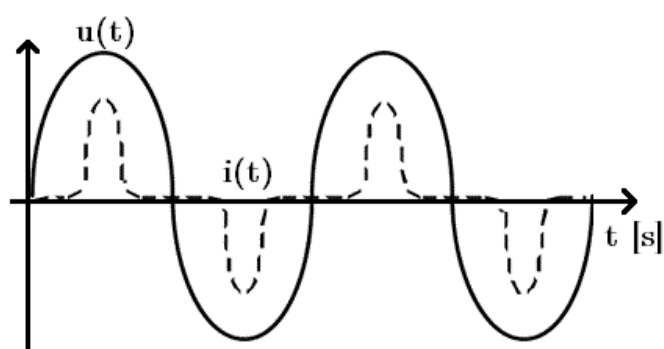
Pri potrebe filtrovať výstupné napätie z usmerňovača sa zahŕňa do zapojenia induktor L . Pre určenie hodnoty induktora L sa používa vzorec 1.10, kde konštanta k sa vypočíta pomocou 1.11.

$$L = \left(\frac{\Delta U_a}{I_d \omega} \right) k \quad (1.10)$$

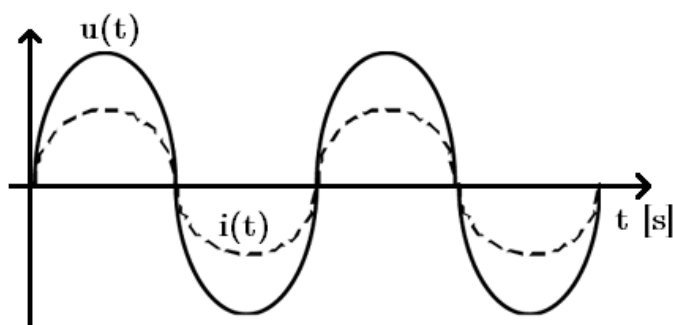
$$k = \sqrt{1 - \left(\frac{q}{\pi} \sin \left(\frac{\pi}{q} \right) \right)^2} - \left(\frac{q}{\pi} \sin \left(\frac{\pi}{q} \right) \right) \arccos \left(\frac{q}{\pi} \sin \left(\frac{\pi}{q} \right) \right) \quad (1.11)$$

Jeden z dôležitých faktorov, na ktorý sa v dnešných moderných napájacích zdrojoch kladie väčší dôraz, je **účinník**, označovaný ako $\cos \varphi$ alebo aj PF (*angl. power factor*, ďalej PF). Je to pomer činného a zdanlivého elektrického výkonu v obvode. Vyjadruje akú veľkú časť z celkového odoberaného výkonu premieňa obvod na užitočný výkon, stratový alebo nevyužitý výkon. Pre DC obvod a zdroj AC napájaný čistý odpor je použitý a dodaný výkon $P = U \cdot I$. V striedavom obvode, ktorý riadi všeobecnú záťaž, sa pracuje so strednou efektívnou hodnotou RMS (*angl. root mean square*, ďalej RMS) prúdu a napätia, aby sa vypočítal „skutočný“ alebo ekvivalentný jednosmerný výkon dodávaný do záťaže. Potom rovnica pre výpočet výkonu je $P = I \cdot U \cdot \cos(\varphi)$, kde I a U sú efektívne hodnoty a φ je fázový uhol medzi nimi. $\cos \varphi$, teda účinník, je vyjadrený buď ako číslo od 0 do 1, alebo ako percento od 0 % do 100 %. Ak $\varphi = 0$, tak $P = I \cdot U$, rovnako ako pre rezistor alebo pri jednosmernom prúde. Ak $\varphi = 90^\circ$, tak potom výkon dodávaný do záťaže je 0 aj napriek tomu, že zdroj dodáva prúd. Generátor poskytujúci energiu ju musí aj napriek tomu dodávať. Z toho vyplýva, že napájacia sieť v bežnom napájacom zdroji, bez akejkoľvek korekcie účinníka, v podstate napája veľký kondenzátor, umiestnený za usmerňovacom, a vo výsledku predstavuje pre generátor „nereálnu“ záťaž. V závislosti od komponentov v obvode je účinník približne 55 % až 75 %, čo znamená, že generátor musí poskytnúť viac energie, ako sa reálne použije. Tento rozdiel sa prejaví vo forme tepla alebo sa „odrazí“ späť do napájacej siete.[6]

Najbežnejším prostriedkom na zredukovanie tejto skutočnosti je použitie regulátora účinníka (*angl. power factor correction*, ďalej PFC). V prípade napájacieho zdroja, nízka hodnota účinníka nie je spôsobená reaktívnym (teda kapacitným alebo indukčným) zaťažením, ale vysoko nelineárnym zaťažením. Čisto reaktívna záťaž sa dá korigovať pridaním induktora, v prípade kapacitnej záťaže, alebo kondenzátora, v prípade indukčnej záťaže. Nelineárne zaťaženie predstavuje okrem zníženia hodnoty účinníka aj značné množstvo „šumu“, ktoré pôsobí na napájacej sieti AC vo forme harmonickej rezonancie sieťového napájania. Porovnanie vstupných priebehov prúdu a napätia s a bez PF regulátora je na Obr. 1.6 a Obr. 1.7, kde je pozorovateľný rozdiel medzi vstupnými prúdmi spínacieho zdroja s regulátorom PF a bez neho.[6]



Obr. 1.6: Vstupné napätie a prúd SMPS bez použitia PFC



Obr. 1.7: Vstupné napätie a prúd SMPS s použitím PFC (ideálny, pri PF=1)

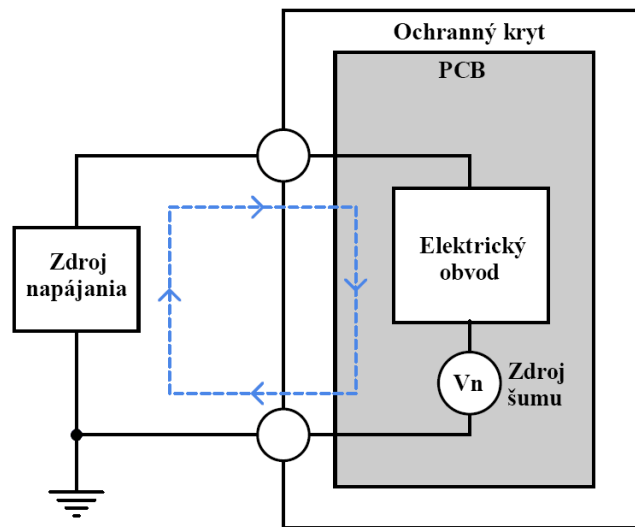
Z hľadiska sériovej výroby a implementácie zariadenia v hromadnom množstve je zavedenie PFC nevyhnutná vec. Avšak jeho zavedenie do návrhu prináša rozmerové a cenové navýšenie výsledného produktu. Taktiež z hľadiska výkonu, PF regulácia nadobúda väčší význam pri aplikáciách s výkonom nad 100 W, čo v prípade zamerania tejto práce nespadá do toho rozsahu, ale napriek tomu je to dôležitý aspekt návrhu, ktorý je nutné spomenúť a podľa noriem dodržiavať.

1.4 Rušenie a filtrácia

Ďalšou dôležitou časťou pri riešení napájania spínaných zdrojov je spĺňanie požiadaviek elektromagnetickej kompatibility EMC (*angl. electromagnetic compatibility*, ďalej EMC)[26]. EMC je schopnosť zariadenia, systému či prístroja správne fungovať aj v prostredí, kde pôsobia zdroje elektromagnetického rušenia,

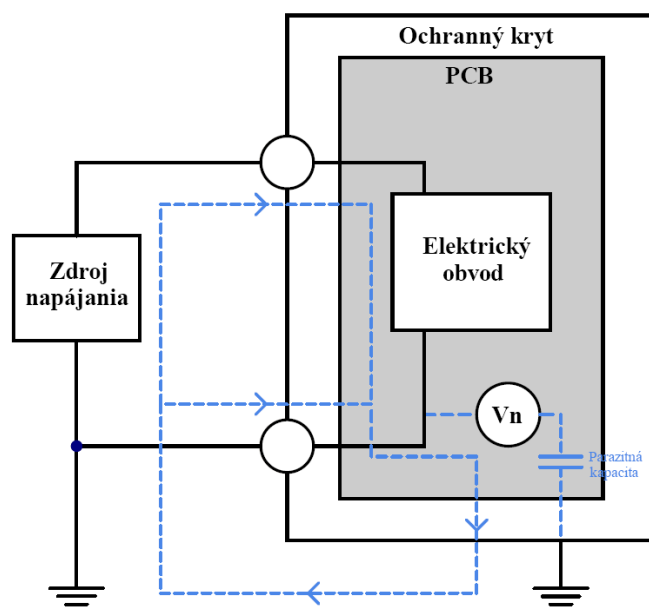
a zároveň svojou vlastnou elektromagnetickou „činnosťou“ nesmú ovplyvňovať alebo rušiť okolie a iné zariadenia. Elektromagnetické rušenie EMI (*angl. electromagnetic interference*, ďalej EMI) sa často používa v spojení s výrazom „emisia“, pretože generovanie elektromagnetických vln môže byť spojené s interferenciou, teda rušením zariadenia. Medzi typy EMI patria emisie vedením (*angl. conducted*) a vyžarovaním (*angl. radiated*). Emisie vedením sa šíria vodičmi a vodivými cestami na doske plošných spojov (DPS). Vyžarované emisie (magnetické pole, elektrické pole a elektromagnetické žiarenie) sú typom elektrického šumu, ktorý sa šíri vzduchom alebo vákuom a ovplyvňuje zariadenia citlivé na tento šum. Z hľadiska spínaných zdrojov, spínacie javy generujú spínací šum, ktorý môže spätne ovplyvňovať zariadenia zapojené v napájacej sieti, preto je ho nutné minimalizovať a aj chrániť zariadenia proti nemu.[7]

Z hľadiska rušenia na zariadení možno rozdeliť šum na diferenčný (*angl. differential mode noise*) a súhlasný (*angl. common mode noise*). V **diferenčnom šume** sa zdroj šumu objavuje na napájacom vedení a šíri sa rovnakým smerom ako prúd napájacieho zdroja. Nazýva sa diferenčný mód šumu, pretože smer vracajúceho sa (GND) je opačného smeru ako šum na napájacom vedení (obr. 1.8).[8]



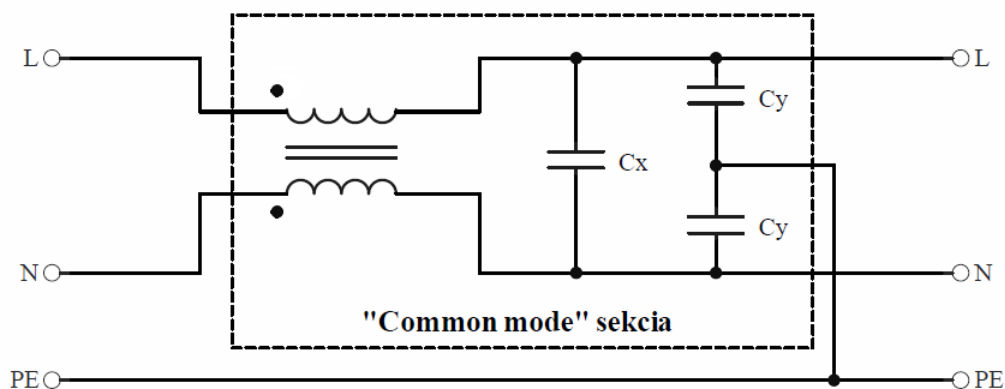
Obr. 1.8: Znázornenie princípu šírenia diferenčného šumu

Súhlasný šum je šum, ktorého šumový prúd prenikol cez parazitnú kapacitu a cez spoločnú zem sa vracia späť do napájacieho vedenia. Názov v angličtine „common mode noise“ získal preto, že smer šumového prúdu na kladnej a zápornej strane zdroja napájania je rovnaký, a preto šumové napätie nie je viditeľné na vedení napájacieho zdroja (obr. 1.9).[8]



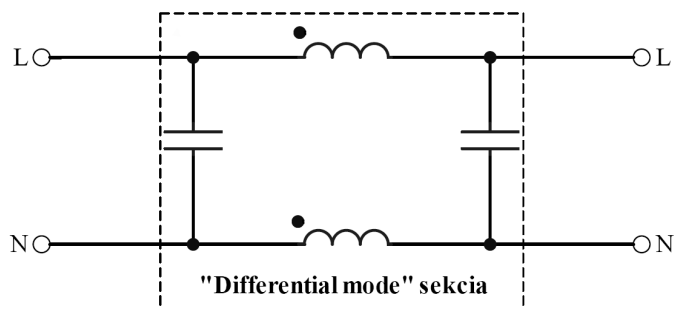
Obr. 1.9: Znázornenie princípu šírenia súhlasného šumu

Na zamedzenie resp. zredukovanie šírenia týchto šumov sa využívajú filtre. Možno ich deliť z hľadiska umiestnenia do dvoch kategórií: **vstupné** a **výstupné**. Pri **vstupných** filtroch je prvým typom **súhlasný filter**. Ten slúži na zamedzenie zvlneného napätia a prúdu na vedení vo vyšších frekvenciách a potlačuje rušenie. Označuje sa taktiež aj ako EMI filter (Obr. 1.10). Skladá sa z dvoch typov komponentov, ktoré spolupracujú na potlačení týchto rušivých signálov, a to z kondenzátorov a prúdovo kompenzovanej tlmičky (*angl. common mode choke*). Induktory zadržiavajú energiu v magnetickom poli a pri ich prechode elektrického prúdu sa zvyšuje celkové napätie. Kondenzátory používané v EMI filtroch s rastúcou frekvenciou znižujú ich impedanciu a prechádzajúci šumový prúd narastá až do skratu, teda neprejde ďalej do obvodu a dodáva tieto VF prúdy do induktorov v sérii. Taktiež býva doplnený často o bezpečnostné a ochranné prvky (bleskoistky, varistory, ochranné diódy a pod.) na dodanie ďalšej úrovne ochrany zariadenia. Použité kondenzátory (C_X a C_Y) zabezpečujú filtráciu šumu a minimalizáciu javov spojených s elektromagnetickým rušením. V prípade kondenzátorov C_X je „zlyhanie“ vo forme skratu, čo aktivuje iné ochranné prvky, ako napríklad poistku, čo ochráni obvod. Pri kondenzátore C_Y je „zlyhanie“ vo forme prerušenia, teda nenastane nebezpečné prepojenie živého vodiča (L) a ochranného vodiča (PE).[9][4]



Obr. 1.10: Príklad prevedenia schematického zapojenia EMI filtra spolu s ochrannými prvkami

Druhým typom je **diferenčný (rozdielový) filter** (Obr. 1.11), v podstate LC filter, ktorý slúži na tlmenie diferenčného šumu a vo väčšine prípadov je radený hneď za EMI filtrom. V praxi je často prípad, že výrobca nezahrňa schematické zapojenie diferenčného filtra v schematickom zapojení rozličných obvodov. Je to z toho dôvodu, že induktory prúdovo kompenzovanej tlmivky sa v určitých situáciách môžu správať aj ako induktory diferenčného filtra. Tento jav sa vyskytuje vo všetkých typoch tlmiviek, avšak v rozdielnych mierach, čo môže byť zámerom špecifickej funkčnosti daného filtra.

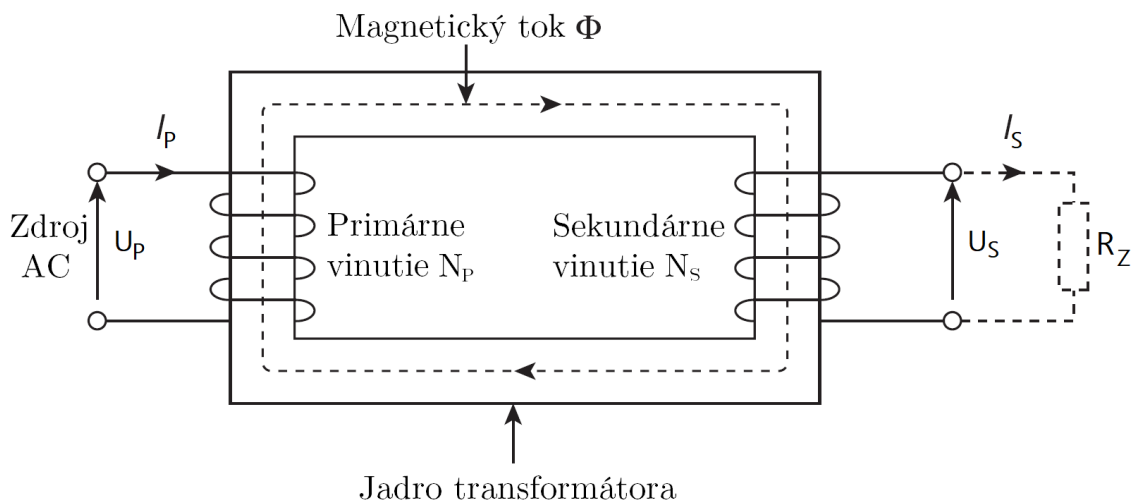


Obr. 1.11: Schematické zapojenie diferenčného filtra

1.5 Transformátor

Transformátor je netočivý elektrický stroj, ktorý prenáša elektrickú energiu z jedného obvodu do druhého pomocou elektromagnetickej indukcie. Používa sa na transformáciu nízkej úrovne striedavého (AC) napätia na vysokú (a naopak), alebo

slúži ako galvanické oddelenie obvodov. V tejto práci má dôležitú úlohu v zapojení meničov. Vyrába sa v rôznych veľkostiach - od miniatúrnych súčiastok po obrovské výkonové stanice, a preto sa pohybuje vo veľkých napäťových (V až kV) a výkonových (VA až GVA) rozsahoch. Jednofázový napäťový transformátor sa skladá z dvoch vinutí: primárneho vinutia (N_P), ktoré býva väčšinou pripojené na zdroj elektrickej energie, a sekundárneho vinutia (N_S), ktoré býva pripojené na záťaž. Tie sú navzájom elektricky izolované, ale magneticky spojené cez spoločné jadro (obr. 1.12).[10]



Obr. 1.12: Vyobrazenie stavby transformátora (Prevzaté z [10])

Pri aplikovaní napätia U_P na primárne vinutie tečie transformátorom prúd, ktorý zapríčini magnetický tok Φ (*angl. magnetic flux*) jadrom. Tento magnetický tok spája primárne a sekundárne vinutie a indukuje v nich magnetické pole vzájomnou indukciou.[10]

Za predpokladu ideálneho transformátora, teda bez strát, je rýchlosť zmeny toku rovnaká pre primárne aj sekundárne vinutie, a teda indukované elektromagnetické pole je v jednom cykle konštantné a platí vzťah 1.12.[10]

$$\frac{N_P}{N_S} = \frac{U_P}{U_S} = \frac{I_S}{I_P} \quad (1.12)$$

Vzájomný pomer vinutí primárneho a sekundárneho transformátora, označovaný aj ako „pomer transformátora“, vytvára buď zvyšujúci ($N_P < N_S$ teda $U_P < U_S$), znižujúci ($N_P > N_S$ teda $U_P > U_S$) alebo izolačný ($N_P = N_S$ teda $U_P = U_S$) transformátor, poskytujúci galvanické oddelenie medzi primárnym a sekundárnym obvodom.[10]

Pri výbere alebo návrhu transformátora je dôležité brať ohľad na parametre a vlastnosti, ktoré ho definujú (Tab. 1.1). Jedným z nich je maximálny „VA rating“. Tento údaj vyjadruje maximálny výstupný prúd I_{OUT} , ktorý transformátor zvládne pri danom napätí. Tento parameter je veľmi závislý od teploty okolia a spôsobu chladenia, čo je taktiež dôležitý aspekt jeho návrhu a výberu. Transformátory sa vyskytujú v rozličných tvaroch, prevedeniach a veľkostiach. Veľkosť transformátora závisí hlavne od použitej frekvencie spínania transformátora, teda pri vyššej frekvencii sa zvyšuje maximálny výkon, a to nám umožňuje zmenšiť rozmer a ponechať rovnaký maximálny výkon za cenu zvýšenia frekvencie. Okrem toho sa veľkosť môže odvíjať aj od typu materiálu a tvaru prevedenia jadra, použitej izolácie, tienenia, prierezu vodiča, prierezu vinutia a ďalšieho. Preto je nutné pri výbere a návrhu transformátora okrem ceny sledovať a porovnávať aj základné parametre. Tie sú uvedené v tabuľke 1.1.

Tab. 1.1: Prehľad základných parametrov transformátora

Parameter	Značka	Jednotka
Operačná frekvencia	f	Hz
Nominálny výkon	P	VA
Vstupné napätie	U_P	V
Výstupné napätie	U_S	V
Efektívnosť	η	%
Počet závitov vinutia	N	-
Indukčnosť vinutia	L	H
Hustota magnetického toku	Φ	Wb/m ²
Magnetická indukcia	B	T
Prierazné napätie izolácie	U	kV

Ako bolo vyššie spomenuté, je dôležité brať ohľad na rozmery, plochu a hlavne materiál, z akého je jadro vyrobené. Jadrá transformátorov sa vyrábajú z rôznych materiálov v závislosti od typu použitia, funkcie a veľkosti transformátora. Častým typom materiálu sú laminované oceľové jadrá, vyskytujúce sa často v EI, UI, LL alebo EE usporiadaní. Tento typ má vysokú permeabilitu a menší výskyt vírivých prúdov. Využíva sa pri nižších frekvenciách, preto vyhovuje hlavne distribučným aplikáciám. Nevýhodou je nutnosť izolácie jednotlivých plátov a zhoršenie vlastností pri vyšších frekvenciách.[11]

Toroidný typ transformátora je tvorený z prstencového jadra a v závislosti od operačnej frekvencie sa vyrába taktiež z dlhých plátov ocele alebo „permalloy“

vinutých do cievky, práškového železa alebo feritu. Tento tvar eliminuje nevýhody konštrukcie EI jadier a transformátorov tvorených z nich. Výhodou toroidných transformátorov je ich menšia veľkosť, váha, menej mechanickej rezonancie a menšie externé magnetické pole. Nevýhodou je materiálová a výrobná cena .[11]

Feritové jadrá možno deliť podľa ich tvaru na valcovité, obalové „shell“ a na toroidné jadrá. Ferit je keramická zlúčenina kovov s obsahom kyslíka, ktoré sú feromagnetické, ale nie sú vodivé. Tieto jadrá vo forme transformátora alebo induktora majú široké využitie z dôvodu ich výborných vlastností, a to vďaka vysokej magnetickej permeabilite spojenej s nízkou elektrickou vodivosťou, čo pomáha zamedzovať vírivým prúdom. Vďaka ich nízkym stratám pri vysokých frekvenciách sa používajú v množstve aplikácií, ako napríklad v rádiových vysielačoch a prijímačoch, signálových aplikáciách a taktiež v spínaných zdrojoch.[11]

Pri reálnom transformátore, na rozdiel od ideálneho, sa musia brať do úvahy aj viaceré nedokonalosti, jednou z nich sú vírivé prúdy (*angl. eddy currents*). Sú to elektrické prúdy vznikajúce v plošných a objemových vodičoch, pri zmene magnetického indukčného toku v ich okolí. Indukované prúdy majú v týchto prípadoch charakter prúdových slučiek. Zoslabujú tak budiaci magnetický tok. Najväčšie zoslabenie nastane v strede prierezu, pretože ten obopínajú všetky indukované prúdy. Ďalšími nedokonalosťami sú hysterézne straty, vnútorný odpor vinutia a „skin effect“ pri vyšších frekvenciách. U reálnych transformátorov nie je všetok magnetický tok spoločný pre obe vinutia. Vždy tam existuje takzvaný rozptylový magnetický tok (*angl. leakage flux*), ktorý je dôvodom vzniku svojoľnej indukcie napätia. Reálny model transformátora obsahuje rozptylovú reaktanciu, vnútorný odpor vinutí a parazitné kapacity. Vnútorný odpor vinutí transformátora má za následok napäťový pokles počas toku prúdu, čo môže vyústiť do nižšieho napätia na sekundárnej strane transformátora, ako je udávané rovnicou (1.12) o pomere vinutí transformátora. Tieto nedokonalosti ovplyvňujú výslednú efektívnosť a celkovú výšku strát transformátora. Tieto fakty je vždy nutné zahrnúť pri výpočtoch a simuláciách pred návrhom alebo výberom fyzického transformátora.[11][1]

Skin effect je jav, pri ktorom má AC tendenciu šíriť sa vo vodiči tak, že prúdová hustota je najväčšia v blízkosti povrchu vodiča a klesá exponenciálne s väčšou hĺbkou vodiča. Elektrický prúd prúdi v oblasti zvanej „skin depth“, čo je oblasť medzi povrchom vodiča a jeho stredom. Veľkosť tejto oblasti závisí od frekvencie AC, teda so zvyšujúcou frekvenciou je tok prúdu viac nerovnomerný. Toto znižuje efektívny prierez vodiča a zvyšuje sa tak jeho efektívny odpor. Tento jav má veľký význam pri návrhu transformátora, pretože vďaka „skin depth“(δ) možno určiť hranicu, kde

zväčšovanie priemeru vodiča má minimálny vplyv na menšie straty a odpor. Na zredukovanie tohto faktu je nutné znížiť frekvenciu alebo zvýšiť počet slabších vodičov, vyplýva to z rovnice 1.13, kde ρ je rezistivita vodiča, μ_r je relatívna permeabilita, μ_0 je permeabilita vákua (vzduchu) a ω je uhlová rýchlosť.[3]

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\omega \mu_r \mu_0}} \quad (1.13)$$

1.6 Spätnoväzbová regulácia

Kvalitný regulovateľný spínaný zdroj obsahuje spätnú väzbu (*angl. feedback*) na ovládanie a regulovanie výstupného napätia a prúdu. Pod riadenie a reguláciu spínaných zdrojov spadá množstvo variant a parametrov, ktoré treba brať do úvahy. Pri týchto aplikáciách neustále narastajú požiadavky na kvalitu regulácie, a to sú:

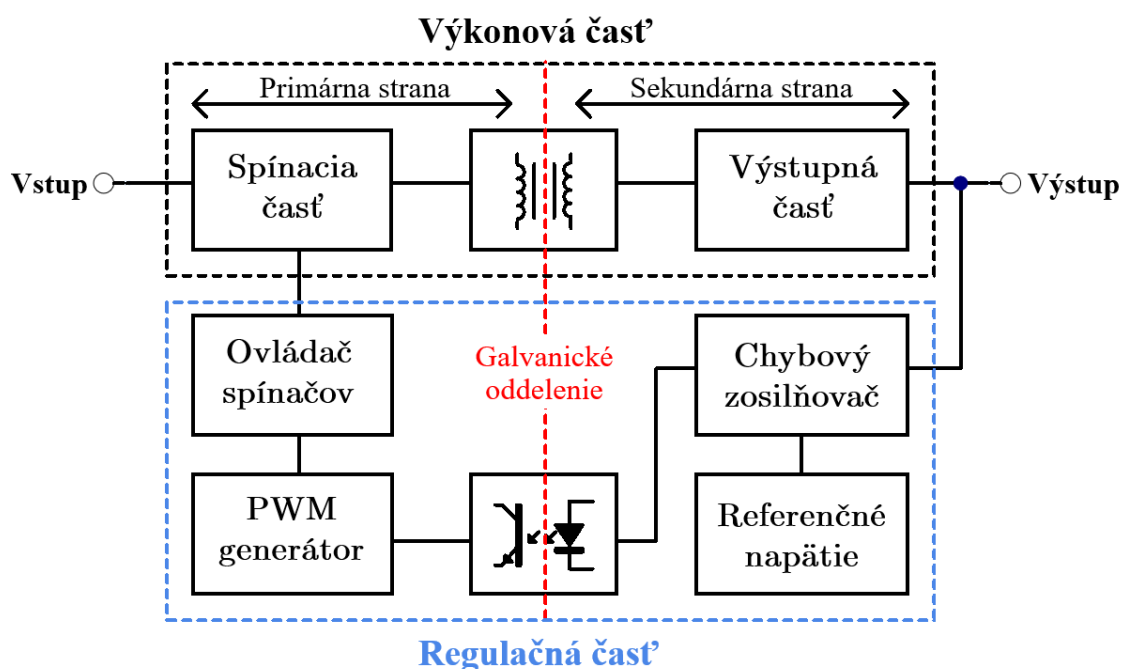
- Statická presnosť
- Rýchlosť a kvalita odozvy na jednotkový skok pri:
 - riadiacom signáli
 - prúdovej záťaži
 - vstupnom napätí v medziobvode
- Rýchlosť a kvalita prúdového obmedzenia
- Rýchly a stabilný prechod medzi jednotlivými reguláciami

Realizáciu riadiacich obvodov možno rozdeliť na analógovú alebo digitálnu. Pri výbere možnosti regulácie a riadenia hrá veľkú úlohu hlavne z ekonomického hľadiska výkonnostná úroveň danej aplikácie. Analógová regulácia má z hľadiska ceny najväčšie zastúpenie v jednoduchých, menej výkonných spotrebných zariadeniach, kde nie je potrebný napr. mikrokontrolér a vývoj riadiaceho algoritmu, čo by pridalo extra čas a náklady na výrobu. Avšak vďaka pokroku technológií a zníženiu ceny výroby komplexných mikrokontrolérov a mikropočítačov sa hranica využiteľnosti digitálnych riadiacich obvodov posunula nižšie a už v súčasnosti možno nájsť digitálnu reguláciu aj v lacnej spotrebnej elektronike, nie len vo vysoko výkonových drahých aplikáciách, ako to bolo kedysi.[12]

Samotné **regulačné** obvody majú úlohu za pomoci spätnej väzby sledovať výstupné napätie (alebo prúd) a porovnávajú ho s požadovanou hodnotou s využitím kompenzačného obvodu. Vznikne chybový rozdiel, vďaka čomu následne ovládaci prvok zmení triedu signálu tak, aby bol tento rozdiel nulový resp. minimálny.[12]

Bloková schéma všeobecného zloženia regulačného obvodu je na obrázku 1.13. Riadiace štruktúry zdrojov možno členiť nasledovne:

- **Priama regulácia napätia**, avšak bez prúdového obmedzenia, čo je dosť nepraktické, no v lacnej spotrebnej elektronike sa to môže vyskytovať.
- **Priama regulácia prúdu** bez napäťovej regulácie, čo niektorým aplikáciám môže vyhovovať, ako napríklad zvaračky alebo stabilné prúdové zdroje.
- **Paralelná regulácia**, je to plynulý prechod medzi reguláciou prúdu alebo napätia, nie však súčasne.
- **Kaskádová regulácia**, je to regulácia s nadradenou napäťovou a podriadenou prúdovou regulačnou slučkou, ktoré pracujú zároveň.



Obr. 1.13: Blokova schéma regulačnej časti výkonového obvodu s galvanickým oddelením

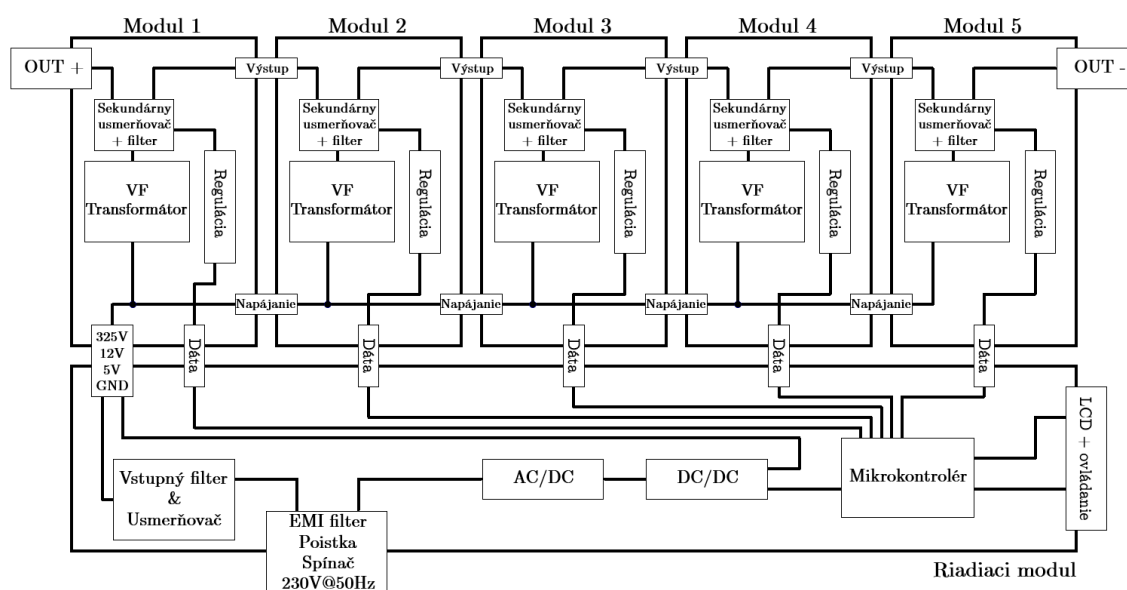
Transformátor pracuje na vysokej spínacej frekvencii, vďaka ktorej sa napätie na primárnej strane transformuje na sekundárnu stranu. Toto spínanie zabezpečujú spínacie tranzistory (MOS-FET alebo IGBT) v meničovej časti obvodu. Na ich ovládanie sa používajú integrované obvody, ktoré ich rapídne spínajú pri vysokej frekvencii. Na toto sa používa tzv. **pulzná šírková modulácia** (angl. *pulse width modulation*, ďalej PWM), ktorá privádza spínacie tranzistory do stavu plne vypnutého alebo zapnutého.

Riadiaci signál vzniká porovnaním interného hodinového taktu (*angl. clock*) a spätnoväzbového napätia z výstupu obvodu. Tieto dve hodnoty sa porovnávajú a na základe toho, ktorá je vyššia alebo menšia, sa na výstupe komparátora objaví buď digitálne, alebo analógové hodnoty. Pri digitálnej regulácii to je logická 1 alebo 0, a pri analógovej regulácii je na výstupe konkrétna hodnota napätia (napr. +5 V a 0 V). Na obrázku 1.13 je „PWM generátor“ vyobrazený samostatne, teda mimo ovládacieho čipu, čo je tiež možnosť, avšak v súčasnosti býva častejšie tento „PWM generátor“ priamo súčasťou čipu, ktorý ovláda spínacie prvky.[12]

Pri vysoko napäťových spínacích zdrojoch je nutné elektronicky oddeliť primárnu a sekundárnu stranu transformátora, teda ich **galvanicky** izolovať. Toto zabezpečuje samotný transformátor na výkonovej časti obvodu vďaka svojmu fyzikálnemu princípu funkčnosti. V praxi možno regulačné a riadiace obvody umiestniť buď na primárnu stranu alebo sekundárnu stranu, je to závislé od návrhových prvkov, presnosti regulácie a výkonových úrovní zariadenia. Pri uvažovaní o riadiacom obvode na primárnej strane, je nutné zaviesť do obvodu spätnú väzbu na zabezpečenie regulácie, ktorá musí taktiež podliehať galvanickému oddeleniu pre zachovanie elektrickej izolácie medzi celou primárnou a sekundárnou stranou zariadenia (obr. 1.13). Takáto izolácia sa môže vykonať viacerými spôsobmi. Najčastejšie sa využívajú optočleny, ktoré fungujú na princípe ožarovania fototranzistora pomocou LED diódy, kde obe strany sú individuálne ovládané elektricky oddelenými obvodmi, teda komunikácia prebieha pomocou svetelného žiarenia (opticky). Ďalším spôsobom izolácie je izolácia za pomoci malého signálového transformátora často riadeného pomocou integrovaného obvodu.[12]

2 Návrh zariadenia

Navrhovaný laboratórny zdroj v tejto práci funguje na koncepte modulárnosti, teda užívateľ je schopný nakonfigurovať zapojenie podľa potreby maximálneho výstupného napätia. Koncept zariadenia pozostáva z výkonových modulových zdrojov (kapitola 3.2.1) bez riadiacej logiky, ktoré je možné reťaziť a dosiahnuť požadovanú konfiguráciu. Takto výsledná konfigurácia je ovládaná riadiacim modulom (kapitola 3.2.2), ktorý obsahuje napájacie obvody a mikrokontrolér na riadenie jednotlivých modulov a užívateľských periférií, ako je vyobrazené na obrázku 2.1.



Obr. 2.1: Bloková schéma konceptu a zapojenia modulárneho zdroja

Na rozdiel od konkurenčných zariadení s fixným maximom výstupného napätia, túto limitáciu navrhovaný zdroj odstraňuje a taktiež vďaka mikrokontroléru od firmy *STMicroelectronics*, je možné využiť výpočtovú silu pri implementácii rôznych spôsobov užívateľského rozhrania a funkcií, ako napríklad dotykový LCD display a enkodér. Veľkou výhodou použitia mikrokontrolérov od firmy *STMicroelectronics* je ich jednoduchá implementácia vďaka množstvu knižníc a programov, ako napríklad *CubeMX*. S technického hľadiska využívajú jednotlivé moduly princíp jednočinného priepustného meniča s transformátorom s maximálnym výstupným napätím 200 V a s maximálnym odoberaným prúdom 100 mA. Každý modul má vlastnú napäťovú a prúdovú reguláciu ovládanú individuálne pomocou mikrokontroléra. Napájanie, vstupný filter a užívateľské rozhranie spolu s perifériami zabezpečuje riadiaci modul.

V prípade tejto práce je riadiaci modul navrhnutý pre 5 modulov v sérii, teda v 1000 V konfigurácii. Najdôležitejšie cieľové parametre navrhovaného zdroja sú vypísané v nasledujúcej tabuľke 2.1.

Tab. 2.1: Cieľové parametre navrhovaného laboratórneho zdroja

Parameter	Značka	Hodnota
Výstupný výkon	P_{OUT}	100 W
Maximálne výstupné napätie	U_{OUT}	1000 V
Maximálny výstupný prúd	I_{OUT}	100 mA
Výstupy	-	1
Typ výstupu	-	Programovateľný
Napäťové rozlíšenie	-	0.5 V
Prúdové rozlíšenie	-	5 mA
Napäťové zvlnenie výstupu	U_{ripple}	100 mV
Prúdové zvlnenie výstupu	I_{ripple}	10 mA
Časová odozva zmeny výstupu	$t_{response}$	50 ms

2.1 Dimenzovanie sieťového napájania

Sieťové napájanie pozostáva z dvoch častí, a to usmerňovača a filtračného kondenzátora. Postup a výpočty potrebné pre návrh jednotlivých častí sú prevzaté z [1]. Bližšie poznatky sú v kapitole 1.3.

Zariadenie je napájané z rozvodnej siete, čo v EU robí $\sim 230 \text{ V}@50 \text{ Hz}$, teda podľa rovnice 2.1 možno určiť maximálnu hodnotu fázového napätia U_a .

$$U_a = \sqrt{2}U_f = \sqrt{2} \cdot 230 \approx 325 \text{ V} \quad (2.1)$$

Na výpočet výstupného napätia usmerňovača U_d pomocou rovnice 2.2 je nutné stanoviť pokles napätia ΔU na kondenzátore. Pre potreby tohto zariadenia sa stanovila hodnota $\Delta U = 5 \text{ V}$. Taktiež je si potrebné stanoviť prenášaný výkon usmerňovačom pre výpočet prúdu usmerňovačom I_d v rovnici 2.3, potrebný na výpočet kapacity zberného kondenzátora.

$$U_d = U_a - \frac{\Delta U}{2} = 325 - \frac{5}{2} = 322.5 \text{ V} \quad (2.2)$$

$$I_d = \frac{P_{OUT}}{U_d} = \frac{100}{322.5} = 0.31 \text{ A} \quad (2.3)$$

Na výpočet zberného kondenzátora sa použije rovnica 2.5, kde Δt je doba vybíjania zberného kondenzátora, ktorú možno určiť pomocou rovnice 2.4.

$$\begin{aligned}\Delta t &= \frac{T}{2} \left[1 - \frac{1}{\pi} \arccos \left(1 - \frac{\Delta U}{U_d} \right) \right] = \\ &= \frac{20 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \left[1 - \frac{1}{\pi} \arccos \left(1 - \frac{5}{322.5} \right) \right] = 9.439 \text{ ms}\end{aligned}\quad (2.4)$$

$$C = I_d \frac{\Delta t}{\Delta U} = 0.31 \cdot \frac{9.439 \cdot 10^{-3}}{5} = 585.22 \text{ } \mu\text{F} \quad (2.5)$$

Z výpočtov pomocou rovnice 2.5 možno vypočítať hodnotu kapacity zberného kondenzátora. Vypočítaná hodnota je dimenzovaná na vyššie prúdy na základe výpočtov a z dôvodu štandardu hodnôt bol zvolený kondenzátor s kapacitou 470 μF . Kondenzátor je stavaný na napätie 400 VDC kontinuálneho chodu.

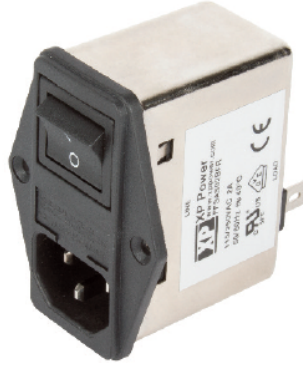
Z hľadiska usmerňovača a usmerňovacích diód je dôležité dimenzovanie jednotlivých diód z prúdového a napäťového hľadiska. Na základe potrieb tejto aplikácie, pre lepšiu spoľahlivosť a jednoduchšiu implementáciu do návrhu, bol zvolený hotový usmerňovač vo vlastnom puzdre. Takto hotový usmerňovač je avšak stále nutné dimenzovať na vhodné prúdy a napätie.

$$I_{RMS} = I_Z \frac{N_S}{N_P} = 0.1 \cdot \frac{38}{30} = 126.67 \text{ mA} \quad (2.6)$$

Pomocou rovnice 2.6 bolo možné určiť efektívny prúd I_{RMS} tečúci z usmerňovača do primárnej strany modulov. Teda celkový minimálny prúd, ktorý musí daný usmerňovač zvládnuť, je približne 0.13 A. Na základe týchto výpočtov bol vybraný dvojcestný usmerňovač v SMD puzdre s názvom DF10S2[17] od firmy ON Semiconductor. Tento usmerňovač figuruje s maximálnym záverným napätím 1000 V a konštantným priepustným prúdom 2 A, čo plne vyhovuje danej aplikácii a zároveň poskytuje napäťovú a aj prúdovú rezervu.

2.2 Návrh filtrov a ochrana pred rušením

Toto zariadenie pozostáva z jedného spoločného odrušovacieho EMI filtra a individuálnych výstupných LC filtrov na každom module. EMI filter je zabezpečený vo forme hotového modulu (obr. 2.2) pre lepšiu spoľahlivosť návrhu.



Obr. 2.2: Fotografia modulu EMI filtra (Prevzaté z [18])

EMI filter od firmy *XP Power* s označením *FFSAS04BFR* [18] je stavaný na 4 A kontinuálneho prúdu a jeho úroveň rušenia spĺňa európsky štandard ČSN EN 60939-2 [27] pre EMI filter. Zvolený EMI filter bol vybratý na základe špecifikácii v dokumentácii a potrieb zariadenia. Špecifické spektrum rušenia nebolo matematicky určené. V zapojení sa taktiež nachádza ako ochranný doplnok NTC termistor (*angl. negative temperature coefficient*) pre „jemnejší štart“ zariadenia.

2.2.1 Návrh výstupného filtračného induktora

Pri návrhu induktora možno uvažovať výstupné napätie za sekundárnym usmerňovačom ako obdĺžnikový priebeh o výške U_{peak} so striedou s . Toto napätie možno určiť pomocou rovnice 2.7, kde $U_{out,module}$ je výstupné napätie modulu.

$$U_{peak} = \frac{U_{out,module}}{s} = \frac{200}{0.48} \approx 417 \text{ V} \quad (2.7)$$

Pomocou rovnice 2.8 možno vypočítať hodnotu filtračného induktora, kde I_{ripple} je zvlnenie prúdu. I_{ripple} sa zvolil ako desatina výstupného prúdu I_{out} .

$$L = \frac{U_{peak}}{2fI_{ripple}}(1-s)s = \frac{417}{2 \cdot 250 \cdot 10^3 \cdot 0.01} \cdot (1-0.48) \cdot 0.48 = 2.1 \text{ mH} \quad (2.8)$$

Dôležitým faktorom je, že zvlnenie I_{ripple} zvyšuje špičkový opakovateľný prúd všetkých polovodičov na sekundárnej a aj primárnej strane meniča a v súčasnosti určuje prúdové namáhanie filtračného kondenzátora. Tlmiaci induktor, tak ako aj transformátor, môže byť vyhotovený z viacerých typov materiálov, avšak vždy by mal byť so vzduchovou medzerou. Pre účely zariadenia bol induktor zvolený od firmy

Bourns s označením 6100-222K-RC o hodnote 2.2 mF napriek výpočtom, a to z dôvodu výberu reálnej súčiastky v štandardnej hodnote. Zvolený induktor sa vyznačuje maximálnou hodnotou jednosmerného prúdu 420 mA a s vlastnou rezonančnou frekvenciou 1.1 MHz, čo plne vyhovuje potrebnej aplikácii. Rovnice a postup sú prevzaté z [12]

2.2.2 Návrh výstupného filtračného kondenzátora

U napájacích zdrojov s malými nárokmi na kvalitu filtrácie výstupného napätia nie je veľkosť kapacity tak kritická, pretože už indukčnosť spolu so zaťažovacím odporom tvorí dolnú priepusť 1. radu, teda teoreticky by mohla byť kapacita nulová. Avšak zvlnenie výstupného napätia a taktiež odstup šumu a signálu sú jedny z dôležitých parametrov laboratórnych zdrojov, ktoré priamo závisia od kvality filtrácie.[12] Výstupné zvlnenie U_{ripple} je dôležitý parameter pohybujúci sa v jednotkách až desiatkách mV, avšak pri cieľenom rozsahu tohto zariadenia je 100 mV dostačujúca hodnota. Kapacitu filtračného kondenzátora možno určiť pomocou rovnice 2.9.

$$C = \frac{(1-s)s}{8f^2L} \cdot \frac{U_{peak}}{2U_{ripple}} = \frac{(1-0.48) \cdot 0.48}{8 \cdot (250 \cdot 10^3)^2 \cdot 2.2 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{417}{2 \cdot 0.1} = 473.12 \text{ nF} \quad (2.9)$$

Dôležitým faktorom pri výbere filtračného kondenzátora a taktiež aj induktora, je dodržanie podmienky, že vlastný rezonančný kmitočet filtru f_0 leží výrazne nižšie ako vstupný pracovný kmitočet f filtru.[12] Toto možno overiť rovnicou 2.10.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \ll f \rightarrow f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{2.2 \cdot 10^{-3} \cdot 473.12 \cdot 10^{-9}}} = 4.93 \text{ kHz} \ll 250 \text{ kHz} \quad (2.10)$$

Z výpočtov možno určiť kapacitu filtračného kondenzátora, avšak z dôvodu štandardizácie hodnôt kondenzátorov bola zvolená hodnota 1 uF. Dvojnásobné zväčšenie hodnoty kapacity zapríčiní posun rezonančnej frekvencie f_0 z hodnoty 4.93 kHz na 3.39 kHz, čo z hľadiska filtrácie a zvlnenia výstupného napätia má zanedbateľný vplyv. Pre danú hodnotu kapacity bol zvolený kondenzátor s označením ESE105M450AG3AA od firmy KEMET.

2.3 Návrh transformátora

Rovnice použité na výpočet sú prevzaté z [12]. Pred návrhom transformátora je nutné stanoviť si niekoľko základných parametrov, ktoré budú udávať jeho vlastnosti. Tabuľka 2.2 obsahuje elektrické parametre ovplyvňujúce návrh a výber vhodného materiálu.

Tab. 2.2: Parametre potrebné pre návrh transformátora

Parameter	Značka	Hodnota
Pracovná frekvencia	f	250 kHz
Maximálna strieda	s	0.48
Primárne napätie	U_P	325 V $\pm 10\%$
Sekundárne napätie	U_S	200 V
Výstupný prúd	$I_{out,module}$	100 mA

Na určenie veľkosti jadra a ďalších parametrov je nutné určiť prenášaný výkon P_T jedného výkonového modulu, ktorý možno vypočítať pomocou rovnice 2.11. Výstupný prúd jednotlivých modulov $I_{out,module}$ je totožný z celkovým výstupným prúdom I_{OUT} . Je to z dôvodu konfigurácie využívajúcej jeden modul.

$$P_T = U_S \cdot I_{out,module} = 200 \cdot 0.1 = 20 \text{ W} \quad (2.11)$$

Prierez jadra A možno vypočítať pomocou rovnice 2.12, kde $k_{p,Cu}$ je činiteľ plnenia medi, je to konštanta s hodnotou 0.3. Maximálny prúd vo vinutí I_{max} bol zvolený ako 0.2 A, avšak túto hodnotu je možné dopočítať spätne pomocou rovnice 2.16.

$$A = \sqrt{\frac{P_T}{k_{p,Cu} I_{max} f B_{max} \sqrt{s}}} = \sqrt{\frac{20}{0.3 \cdot 0.2 \cdot 250 \cdot 10^3 \cdot 0.2 \cdot \sqrt{0.48}}} = 98 \text{ mm}^2 \quad (2.12)$$

Ako vhodná možnosť z hľadiska veľkosti a parametrov bolo zvolené jadro transformátora s označením *B65815E0000R097*, typu *RM12* vyrobené z materiálu ferit s označením *N97*. Toto zvolené jadro sa vyznačuje parametrami uvedenými v tabuľke 2.3. Ďalšia dokumentácia je dostupná v [13].

Tab. 2.3: Parametre jadra transformátora

Parameter	Značka	Hodnota
Maximálna hodnota magnetickej indukcie	B_{max}	0.2 T
Efektívna permeabilita jadra	μ_e	1640
Indukčný faktor	A_L	5300 nH
Prierez vinutia	A_N	72 mm ²
Priemerná dĺžka jedného vinutia	l_N	61 mm
Efektívny prierez jadra	A_e	146 mm ²
Minimálny prierez jadra	A_{min}	125 mm ²

Pre správny chod transformátora je nutné udržať hodnotu magnetickej indukcie pod maximálnou úrovňou B_{max} . Pomocou rovnice 2.13 možno určiť reálnu hodnotu a overiť funkciu transformátora v bezpečnej oblasti. Počet vinutí na primárnej strane N_P bol určený pomocou opätovného výpočtu magnetickej indukcie B až po optimálnu hodnotu spadajúcu pod maximálnu hodnotu B_{max} .

$$B = \frac{U_P \cdot T \cdot s}{A_e \cdot N_P} = \frac{322.5 \cdot (\frac{1}{250 \cdot 10^3} \cdot 0.48)}{146 \cdot 10^{-3} \cdot 30} = 141.3 \text{ mT} \quad (2.13)$$

Pomocou rovnice 2.14 je možné pri určení primárneho vinutia $N_P = 30$ dorátať sekundárne vinutie N_S a tak stanoviť najdôležitejšie dva parametre pri návrhu transformátora.

$$N_S = \frac{N_P \cdot U_S}{U_P \cdot s} = \frac{30 \cdot 200}{322.5 \cdot 0.48} \approx 38 \quad (2.14)$$

Z určených počtov vinutí možno určiť hodnotu indukcie pomocou rovnice 2.15 pre primárne a sekundárne vinutie. Tieto parametre sú dôležité pri ďalších výpočtoch a tvorení simulačných modelov.

$$\begin{aligned} L_P &= A_L \cdot N_P^2 = 5.3 \cdot 10^{-3} \cdot 30^2 = 4.77 \text{ mH} \\ L_S &= A_L \cdot N_S^2 = 5.3 \cdot 10^{-3} \cdot 38^2 = 7.6532 \text{ mH} \end{aligned} \quad (2.15)$$

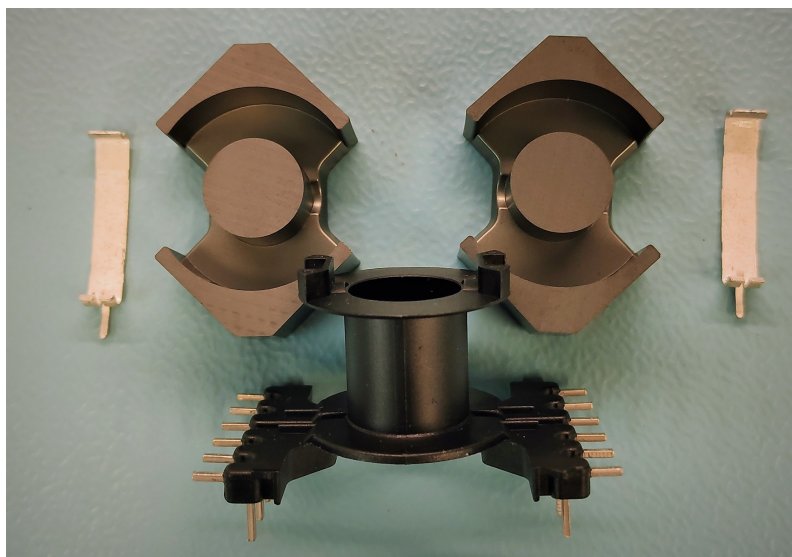
Z rovnice 2.16 možno určiť maximálny prúd vo vinutí, vďaka ktorému možno spätne určiť prierez jadra v rovnici 2.12 a tak overiť správnosť výberu zvoleného jadra *B65815E0000R097*.

$$I_{max} = (B_{max} A_e) \frac{N_P}{L} = (0.2 \cdot 146 \cdot 10^{-3}) \cdot \frac{30}{4.77 \cdot 10^{-3}} = 0.184 \text{ A} \quad (2.16)$$

Na základe nízkych výkonových požiadaviek bol zvolený typ *DN1E200* medeného vodiča s priemerom 0.25 mm na vytvorenie potrebného vinutia. Napriek vysokej operačnej frekvencii a hĺbke „skin efektu“ (kapitola 1.5) vypočítanej z rovnice 2.17 bol presný výpočet priemeru vodiča vynechaný. Zariadenie nepracuje na tak vysokej výkonovej úrovni, aby to malo viditeľné nepriaznivé účinky.

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\omega \mu_r \mu_0}} = \sqrt{\frac{1.68 \cdot 10^{-8}}{\pi \cdot 250 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 1.257 \cdot 10^{-6}}} = 130.45 \text{ } \mu\text{m} \quad (2.17)$$

Sada transformátora použitá na formovanie vinutia a následné umiestnenie na DPS výkonového modulu je vyobrazená na obrázku 2.3.



Obr. 2.3: Fotografia vrchného a spodného dielu jadra transformátora s kostričkou a uchytávacími sponami

2.4 Dimenzovanie spínacieho tranzistora

Pri umiestnení tranzistora do obvodu je nutné brať do úvahy maximálnu možnú hodnotu prierného napätia tranzistora. Na určenie bezpečnej hranice treba uvažovať toleranciu 10 % primárneho napätia U_P a plus jeho dvojnásobok, teda rezerva o hodnote približne 700 V by mala vyhovovať aplikácii.

Jeden z ďalších dôležitých parametrov je prúd tečúci tranzistorom. Možno určiť tri druhy hodnôt prúdov, a to hodnoty stredného prúdu $I_{DS(str)}$ (rovnica 2.18), efektívneho prúdu $I_{DS(ef)}$ (rovnica 2.19) a maximálneho prúdu $I_{DS(max)}$ (rovnica 2.20). Zjednodušene sú to hodnoty, ktorým musí tranzistor odolať, teda sa volí hodnota vyššia ako maximálna. Súčasné možnosti na trhu naznačujú trend, že okrem vysokej napäťovej odolnosti, taktiež disponujú s veľkou prúdovou odolnosťou, teda pri tejto aplikácii splniť tieto požiadavky nie je problém.

$$I_{DS,str} = I_{out} \frac{N_S}{N_P} s = 0.1 \cdot \frac{38}{30} \cdot 0.48 = 60.8 \text{ mA} \quad (2.18)$$

$$I_{DS,ef} = I_{out} \frac{N_S}{N_P} \sqrt{s} = 0.1 \cdot \frac{38}{30} \cdot \sqrt{0.48} = 87.75 \text{ mA} \quad (2.19)$$

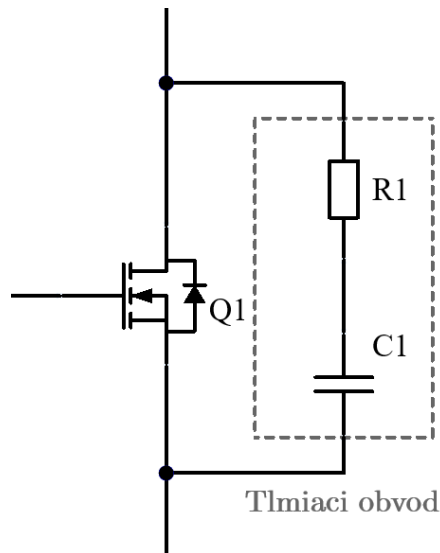
$$I_{DS,max} = I_{out} \frac{N_S}{N_P} = 0.1 \cdot \frac{38}{30} = 126.67 \text{ mA} \quad (2.20)$$

Na základe zvolených minimálnych požiadaviek bol vybraný tranzistor s označením *STB36N60M6* od firmy *STMicroelectronics* v prevedení *D²PAK*. Dôležité parametre možno nájsť v tabuľke 2.4 a podrobnejšie informácie v online dokumentácii [14].

Tab. 2.4: Významné parametre zvoleného spínacieho tranzistora

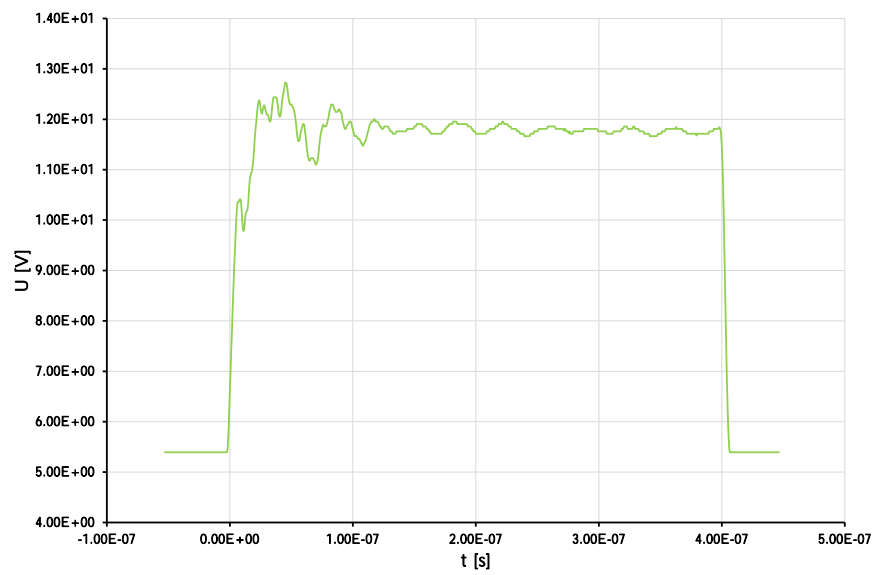
Symbol	Parameter	Hodnota
U_{GS}	Gate-source napätie	$\pm 25 \text{ V}$
$U_{GS(th)}$	Prahové napätie	4 V
I_D	Maximálny udávaný prúd	30 A
U_{DSS}	Drain-source prierazné napätie	700 V
$R_{DS(on)}$	Drain-source statický odpor	$85 \text{ m}\Omega$
t_r	Čas nábežnej hrany	5.3 ns
t_f	Čas zostupnej hrany	7.3 ns

Zvolený tranzistor *STB36N60M6* vyhovuje vlastnosťami pre danú aplikáciu. Vďaka nízkemu odporu na Drain-source $R_{DS(on)} = 85 \text{ m}\Omega$ sa vyznačuje nízkymi stratami, (výpočet v kapitole 2.5). Tranzistor bol zvolený aj z dôvodu rýchlej časovej odozvy na spínanie. Tento parameter je obzvlášť dôležitý, kde vyššia frekvencia spínania zapríčiňuje nežiaduce prekmity spínania a ďalšie parazitné javy. Vznik parazitného napäťového prekmity na tranzistore počas spínacieho deja je zapríčinený neúspešným naviazaním magnetického toku na sekundárne vinutie. Spôsobuje to vzniknutá parazitná rozptylová indukčnosť vinutia transformátora v sériovom zapojení s tranzistorom. Túto skutočnosť nemožno úplne odstrániť z dôvodu fyzikálnych limitácií transformátora, ale je to možné zredukovať, a to zavedením paralelnej kombinácie prvkov R a C v sérii, tvoriacich **tlmiaci obvod**, v angličtine ako „snubber circuit“, obr. 2.4.[12]

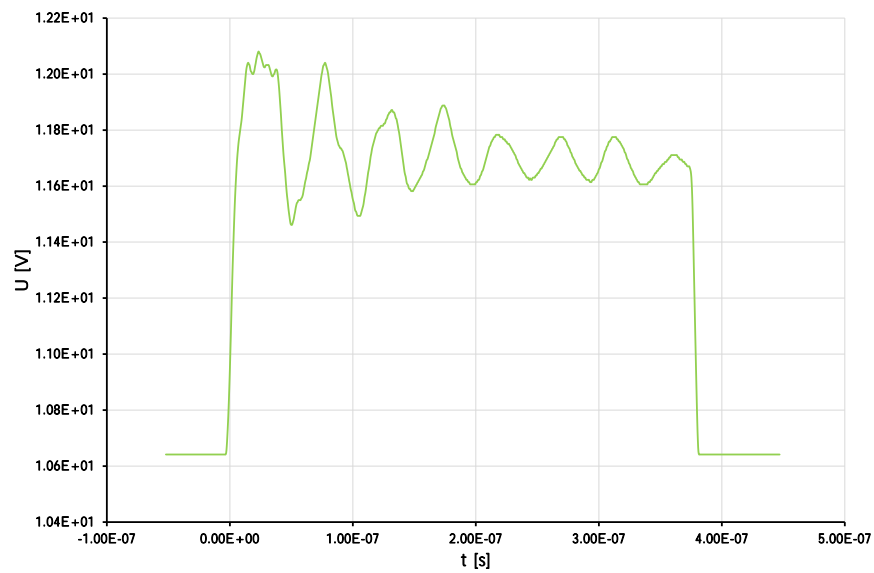


Obr. 2.4: Typické zapojenie R a C na potlačenia napäťových prekmitov

Hodnoty R a C je ideálne určiť experimentálne pomocou osciloskopu tak, aby boli kmitavý obvod R, C a rozptylová indukčnosť L tlmené približne kriticky. Výpočet je možné uskutočniť na základe experimentálnych zistení. V prvom kroku je nutné zistiť oscilačnú frekvenciu f_0 , ako je na priebehu 2.5. Ďalej je potrebné pridať kapacitu C_1 paralelne s tranzistorom, ktorá je mnohonásobne väčšia, tak sa dosiahne aspoň 50 % posunu oscilačnej frekvencie f_1 , ako na priebehu 2.6.



Obr. 2.5: Priebeh oscilačnej frekvencie f_0 bez pridaného kondenzátora



Obr. 2.6: Priebeh oscilačnej frekvencie f_1 s paralelne pridaným kondenzátorom

Z odmeraných frekvencií f_0 a f_1 možno určiť pomer posunutia m pomocou rovnice 2.21

$$m = \frac{f_0}{f_1} = \frac{35.71 \cdot 10^6}{18.87 \cdot 10^6} = 1.8924 \quad (2.21)$$

Pomocou rovníc 2.22 a 2.23 možno určiť parazitnú kapacitu C_0 a parazitnú indukčnosť L_0 , kde C_1 bolo zistené experimentálne s cieľom dosiahnuť približne 50 % posunu.

$$C_0 = \frac{C_1}{(m^2 - 1)} = \frac{15 \cdot 10^{-12}}{(1.8924^2 - 1)} = 5.81 \text{ pF} \quad (2.22)$$

$$L_0 = \frac{(m^2 - 1)}{(2\pi f_0)^2 C_1} = \frac{(1.8924^2 - 1)}{(2 \cdot \pi \cdot 18.87 \cdot 10^6)^2 \cdot 15 \cdot 10^{-12}} = 12.24 \text{ } \mu\text{H} \quad (2.23)$$

Vďaka zisteným hodnotám parazitnej kapacity a indukcie je možné určiť reálne hodnoty potrebné pre správnu funkciu tlmiaceho obvodu. Hodnoty C a L možno určiť z rovnice 2.24 a 2.25.

$$C = 3 \cdot C_0 = 3 \cdot 5.81 \cdot 10^{-12} = 17.43 \text{ pF} \quad (2.24)$$

$$R = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = \sqrt{\frac{12.24 \cdot 10^{-6}}{5.81 \cdot 10^{-12}}} = 1451.45 \text{ } \Omega \quad (2.25)$$

Z vypočítaných hodnôt boli zvolené hodnoty $C = 15 \text{ pF}$ a $R = 2.2 \text{ k}\Omega$ z dôvodu štandardizácie hodnôt. Pre overenie správneho výpočtu možno vypočítať stratový výkon na odpore, ktorý sa určí z rovnice 2.26. Tento výpočet umožňuje prispôbiť zvolenú hodnotu rezistora pre vhodnú tepelnú disipáciu stratového výkonu.

$$P_R = 4fCU_d^2 = 4 \cdot 250 \cdot 10^3 \cdot 15 \cdot 10^{-12} \cdot 322.5^2 = 1.56 \text{ W} \quad (2.26)$$

Z výpočtov možno usúdiť značne vysoký stratový výkon, avšak vďaka použitiu vyššej hodnoty odporu možno uvažovať tento parameter za nižší. Je nutné zaobstaráť si rezistor vyššej výkonovej odolnosti. Metóda, rovnice a experimentálny postup výpočtu reálnych hodnôt R-C tlmiaceho obvodu boli prevzaté z [15].

2.5 Výpočet výkonových strát

2.5.1 Straty na tranzistore

Tranzistor typu MOS-FET možno v zapnutom stave uvažovať ako lineárny odpor. Veľkosť tohto odporu zodpovedá sklonu medznej priamky vo výstupných charakteristikách tranzistoru.[16] Výrobca v dokumentácii [14] udáva $R_{DS(ON)} = 0.85 \text{ m}\Omega$, čo je veľmi nízka hodnota v porovnaní s konkurenčnými tranzistormi na trhu. Vďaka výpočtu efektívneho prúdu $I_{DS(ef)}$ z rovnice 2.19 je možné určiť stratový výkon tranzistora P_{str} pomocou rovnice 2.27.

$$P_{str} = R_{DS(on)} I_{CE(ef)}^2 = 85 \cdot 10^{-3} \cdot 0.0878^2 = 0.65 \text{ mW} \quad (2.27)$$

Okrem vlastného vnútorného odporu, môžu byť straty zapríčinené aj prepínacími dejmi. Okamžitý stratový výkon $P_{str,p}$ pri zapínanom a vypínanom deji je súčinom okamžitej hodnoty napätia u_{DS} a okamžitej hodnoty prúdu i_{DS} . Stratová energia pri zapínaní (resp. pri vypínaní) je integrálom z tohoto výkonu za dobu $t_{d(on)}$ (resp. $t_{d(off)}$). Pri práci tranzistora s pracovným kmitočtom f , zapínací a vypínací dej sa opakuje f -krát za sekundu. Prepínací stratový výkon je súčtom stratových energií násobených kmitočtom f . S veľmi dobrou presnosťou možno prepínací stratový výkon vypočítať bez nutnosti integrovania podľa vzťahu 2.28.[16]

$$P_{str,p} = \frac{1}{4} U_d I_{DS,max} (t_{d(on)} + t_{d(off)}) f \quad (2.28)$$
$$P_{str,p} = \frac{1}{4} \cdot 322.5 \cdot 0.127 \cdot (15.2 + 50.2) \cdot 10^{-9} \cdot 250 \cdot 10^3 = 167.4 \text{ mW}$$

Celkový stratový výkon v spínanom tranzistore je súčtom prepínacieho stratového výkonu $P_{str,p}$ a stratového výkonu vedením tranzistora P_{str} , rovnica 2.29.

$$P_{str,celk} = P_{str} + P_{str,p} = 0.65 \cdot 10^{-3} + 167.4 \cdot 10^{-3} \approx 168 \text{ mW} \quad (2.29)$$

2.5.2 Straty usmerňovacích diód

V prípade primárneho usmerňovača, z jeho VA charakteristiky [17] pre teplotu $T_A = 25^\circ\text{C}$ bolo pri napätí $U_1 = 0.76 \text{ V}$ odčítaný prúd $I_1 = 0.1 \text{ A}$ a pre napätie $U_2 = 0.9 \text{ V}$ odčítaný prúd $I_2 = 1 \text{ A}$. Pomocou rovnice 2.30 možno určiť diferenciálny odpor. Vďaka diferenciálnemu odporu R_d a hodnoty prahového napätia $U_0 = 0.65 \text{ V}$ z charakteristiky, možno určiť hodnotu stratového výkonu usmerňovača P_Z pomocou rovnice 2.31, kde $I_{str} = I_d/2$ z rovnice 2.3 a $I_{ef} = I_d/\sqrt{2}$.

$$R_d = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{U_2 - U_1}{I_2 - I_1} = \frac{0.9 - 0.76}{1 - 0.1} = 155.6 \text{ m}\Omega \quad (2.30)$$

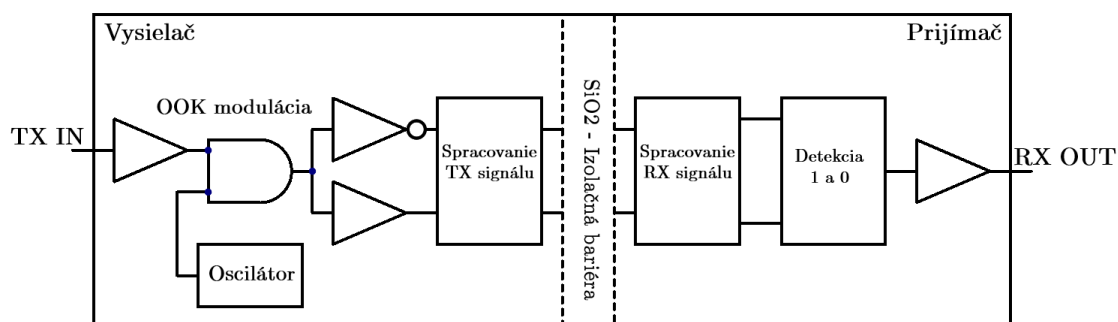
$$P_Z = U_0 I_{str} + R_d I_{ef}^2 = 0.65 \cdot 0.155 + 0.1556 \cdot 0.219^2 = 108.1 \text{ mW} \quad (2.31)$$

V prípade sekundárneho usmerňovača zloženého z dvoch diód s označením *RF071LAM4S* [19] od firmy *ROHM Semiconductor* je výpočet totožný ako pre primárny usmerňovač, avšak zvlášť pre každú diódu. Pre danú diódu je $R_d = 0.286 \text{ }\Omega$, $U_0 = 0.5 \text{ V}$ a teda $P_Z = 55.5 \text{ mW}$, kde prúdy sú z rovníc 2.18 a 2.19.

2.6 Izolácia

Izolácia SMPS je nevyhnutná nielen z hľadiska vysokého napätia, ale aj z hľadiska galvanického oddelenia. Ako bolo rozobraté v kapitole 1.6, pri spínaných zdrojoch je nevyhnutnosť spätnej väzby. Vo väčšine prípadov spätná väzba, respektíve prvky nevyhnutné na uskutočnenie spoľahlivej spätnej väzby, sa nachádzajú na sekundárnej strane zariadenia. Spätná väzba z hľadiska funkčnosti a hlavne bezpečnosti býva vo väčšine prípadov galvanicky oddelená, teda je prepojená elektricky nevodivým spôsobom. Galvanické oddelenie možno uskutočniť najčastejšie pomocou opto člena alebo budiaceho transformátora.

V prípade tejto aplikácie bol zvolený spôsob galvanického oddelenia pomocou vysoko impedančného izolačného operačného zosilňovača od firmy *Texas Instruments* s označením *AMC1311BDWV*. Tento integrovaný obvod pracuje na princípe zapínania a vypínania kľúčovania modulačnej schémy (*angl. on-off keying (OOK)*), vďaka čomu sa signál preniesie cez izolačnú bariéru na báze SiO_2 . Ako je znázornené na obrázku 2.7, vysielateľ moduluje vstupný dátový tok (TX IN) s interne generovaným vysokofrekvenčným nosičom cez izolačnú bariéru, ktorý predstavuje digitálnu 1 a v prípade nevysielania signálu to reprezentuje digitálnu 0. Nominálna frekvencia nosiča použitá vo vnútri *AMC1311* je 480 MHz. Následne prijímač po podrobnej úprave signálu demoduluje signál a produkuje výstup (RX OUT).[20]



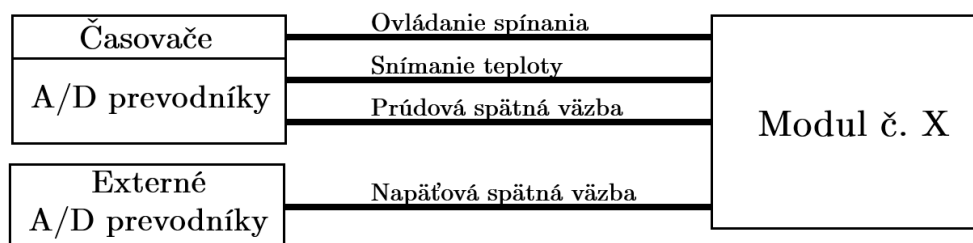
Obr. 2.7: Blokový diagram izolačného kanálu izolovaného operačného zosilňovača (Prevzaté z [20])

2.7 Návrh regulačného obvodu

V nadväznosti na kapitolu 1.6, spínané zdroje bývajú najčastejšie regulované prúdovou a napäťovou reguláciou, alebo kombináciou oboch. S dôvodu konceptu modulárnosti, teda možnosti zamieňať a párovať jednotlivé moduly, bolo nutné zvoliť prístup, kde jednotlivé moduly obsahujú vlastnú napäťovú a prúdovú reguláciu riadenú jednou riadiacou jednotkou.

Na základe obrázku 2.1 možno vidieť okrem napájania a rozloženia zariadenia aj rozloženie a rozdelenie regulácie. Samotný modul obsahuje okrem výkonovej časti regulačné obvody s integrovanými obvodmi, s cieľom minimalizovať komplexnosť regulácie a vo výsledku vyviešť len nevyhnutné signály na výstupný konektor slúžiaci na spojenie s riadiacim modulom. Riadiaci modul okrem napájacích napätí 325 V, 12 V a 5 V, zabezpečuje samotnú reguláciu jednotlivých modulov, rozhranie a užívateľské periférie. Jeho výpočtovú silu zabezpečuje mikrokontrolér od firmy *STMicroelectronics* s označením *STM32F413ZHT6* [21]. Tento mikrokontrolér bol zvolený z dôvodu veľkej flexibility z hľadiska komunikačných protokolov, rýchlosti, počtu vývodov a hlavne z dôvodu počtu a rýchlosti interných časovačov. Význam interných časovačov hrá úlohu z dôvodu ich implementácie a tvorby PWM signálu na ovládanie a reguláciu spínania jednotlivých výkonových modulov, ako je znázornené na obrázku 2.8. Vďaka osemnástim časovačom, každý s frekvenciou až 100 MHz, je teoretický limit počtu modulov rovný počtu časovačov. Interné časovače sa vyznačujú aj určitým počtom kanálov, na ktorých pracujú, čo umožňuje reguláciu pre jednotlivé moduly v rozličných fázach, teda moduly môžu operovať v rozličných časových oknách a teda záťaž sa rovnomernejšie rozloží medzi moduly. Vďaka veľkej rýchlosti interných analógovo digitálnych prevodníkov (ADC) mikrokontroléra s kombináciou externých AD prevodníkov je možné spracúvať jednotlivé napäťové a aj prúdové spätné väzby

a regulovať jednotlivé moduly. Vďaka použitiu externých AD prevodníkov na napäťovej spätnej väzbe je možné dosiahnuť väčšieho rozlíšenie v regulácii a je možné spracovávať diferenčný signál z jednotlivých modulov, čo prispieva k odolnosti voči rušeniu na spätnej väzbe.



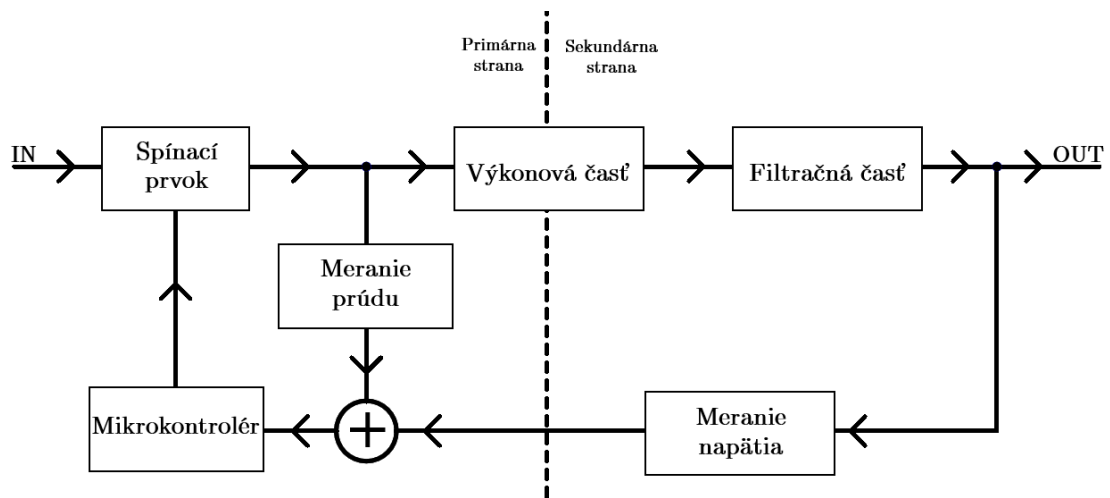
Obr. 2.8: Blokové vyobrazenie zapojenia regulácie a ovládania výkonového modulu

Pri implementácii metódy vlastnej regulácie pre jednotlivé moduly môže nastať množstvo problémov, ktoré ovplyvnia výslednú ovládateľnosť a presnosť výstupného napätia a prúdu. Pre zredukovanie chyby „sčítavania“ napätia jednotlivých modulov do výsledného výstupného celkového napätia U_{OUT} , je nutná osobitná „kontrola“ tohto napätia. Meranie celkového výstupného napätia umožňuje nielen možnosť korekcie a prípadné úpravy časovania regulácie jednotlivých modulov, ale hlavne zabezpečuje presnejšiu hodnotu, ktorú možno vypisovať na LCD. Okrem merania výstupného napätia je nevyhnutné merať taktiež výstupný prúd, pre kompletnosť funkcie navrhovaného zdroja. Prúdová regulácia jednotlivých modulov prispieva k celkovej regulácii a slúži taktiež ako „prúdová ochrana“ (kapitola 2.7.3), avšak pre presný výpis odoberaného prúdu a správny chod ďalších funkcií zariadenia je nutné merať aj samotný celkový výstupný prúd I_{OUT} . S dôvodu bezpečnosti a dodržania galvanického oddelenia sú tieto merania vykonané podobným spôsobom, ako je rozobraté v nasledujúcich kapitolách 2.7.2 a 2.7.3. Realizácia v podobe výstupného modulu je vyobrazená a opísaná v kapitole 3.2.3.

2.7.1 Simulácia regulácie

Z realizovaných meraní, teda získaných hodnôt zo spätných väzieb, možno vyvodiť regulačné závery, vďaka ktorým možno ovládať a meniť rôzne vlastnosti zariadenia, ako napríklad výstupné napätie a prúd. Napriek spoľahlivosti spätných väzieb a správnosti regulovaných prvkov je nutné dbať na dynamické vplyvy a javy, pôsobiace v zariadení a na zariadenie, ktoré môžu zapríčiniť nespoľahlivosť a nepresnosť funkcie zariadenia. V prípade výstupného napätia je nutné brať do úvahy rôzne externé zásahy na výstup, ako napríklad skoková záťaž alebo náhle zmeny hodnoty výstupného

napätia. Na zabezpečenie spoľahlivosti, presnosti a rýchlej odozvy v prípade hodnoty výstupného napätia, je potrebné tento parameter dynamicky kontrolovať a na základe chybového rozdielu upravovať. Je známa *proporcionálne integračno-derivačná* (ďalej PID) teória riadenia. PID riadiaci algoritmus/regulátor je v stručnosti riadiaca jednotka/algoritmus, ktorá berie do úvahy prítomnosť, minulosť a budúcnosť vzniknutej chyby od požadovanej hodnoty a na základe nej upraví dané parametre s cieľom dosiahnuť minimálnu veľkosť chybového rozdielu. Každá z častí PID algoritmu (proporcionálna, integračná a derivačná) má svoju úlohu v dosiahnutí takmer nulovej chybovosti požadovanej hodnoty.[1] Bloková implementácia regulačného systému v zariadení z teoretického hľadiska je vyobrazená na obrázku 2.9.

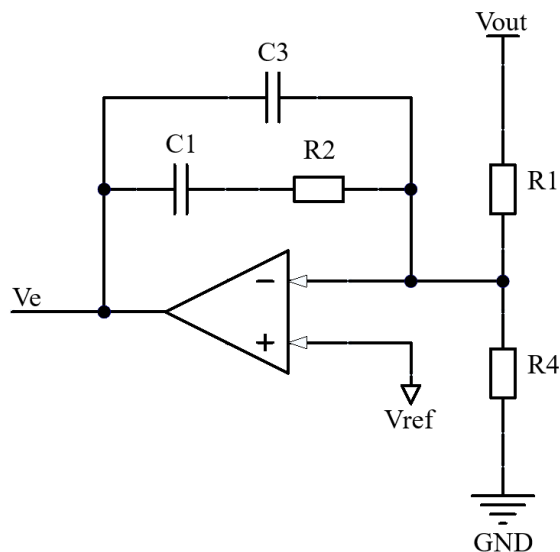


Obr. 2.9: Blokové vyobrazenie regulačného obvodu zariadenia

V prípade navrhovaného zariadenia sa regulácia v podstate skladá z merania prúdu prechádzajúceho primárnym vinutím a napäťovej spätnej väzby z výstupného napätia. Tieto údaje sa spracovávajú softvérovým regulačným prvkom a v dynamickom režime je ovládaný spínaný tranzistor pomocou integrovaného obvodu (kapitola 2.7.4).

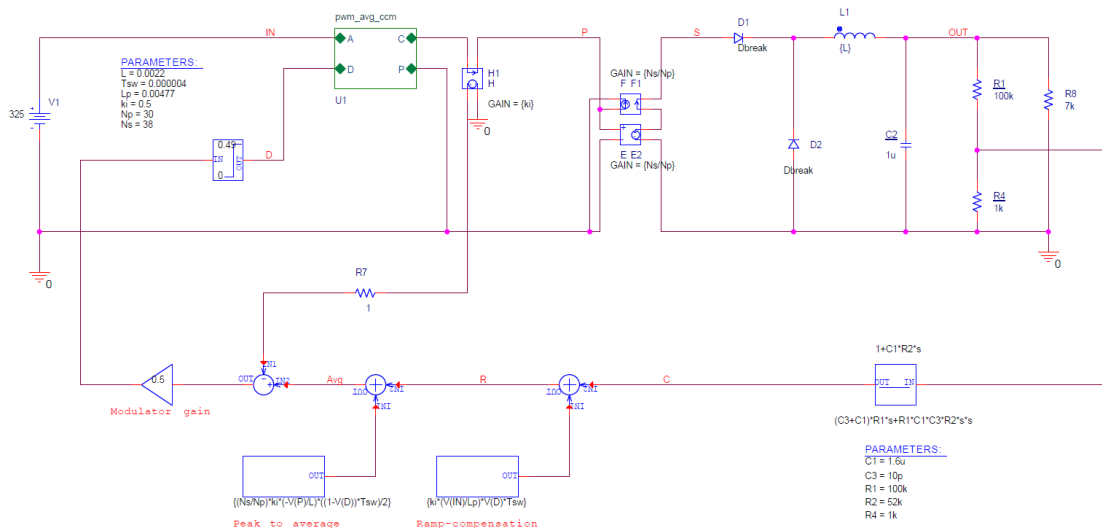
Pre overenie vyššie spomenutej myšlienky bolo nutné realizovať simulačný model zapojenia v spojitom režime na redukciu nežiaducich vplyvov. Simulačné zapojenie vychádzalo z navrhovaného zapojenia, a taktiež z dokumentu [25], popisujúceho podobu prenosovej funkcie 2.32 a ekvivalentné zapojenie fyzického regulačného článku 2.10.

$$H(s) = \frac{1 + C_1 R_2 s}{(C_3 + C_1) R_1 s + R_1 C_1 C_3 R_2 s^2} \quad (2.32)$$

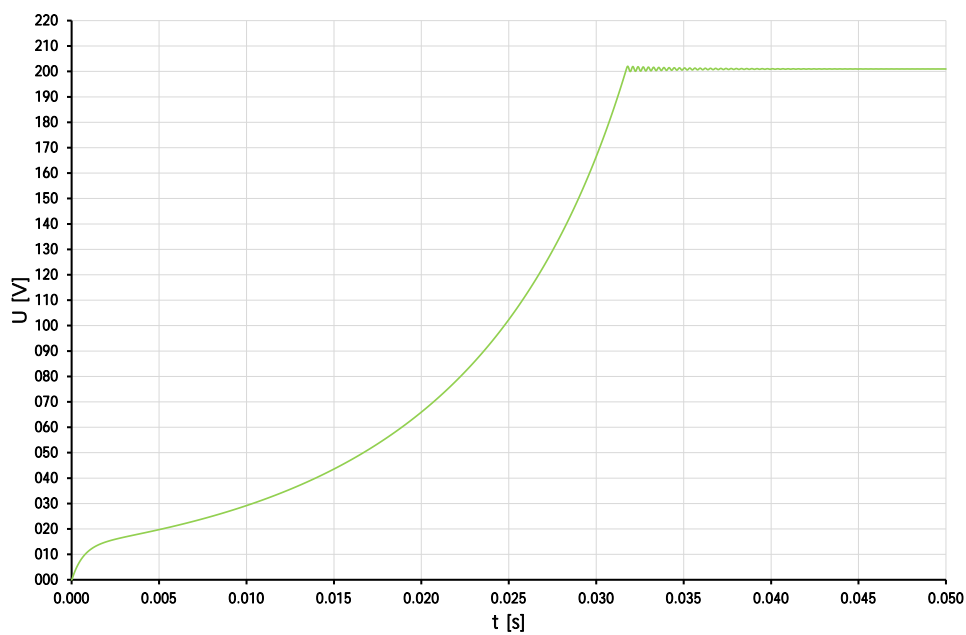


Obr. 2.10: Zhotovenie regulátora z fyzických súčiastok potrebných na určenie prenosovej funkcie 2.32 (Prevzate z [25])

Na základe zapojenia na obrázku 2.10 bolo možné vyhotoviť prenosovú funkciu 2.32 a zostaviť simulačné zapojenie na obrázku 2.11. Táto simulácia reprezentuje chod a správanie regulácie zariadenia. Dynamická regulácia zabezpečuje stabilitu a presnosť dosahovanú na výstupe zariadenia už s implementovanou prenosovou funkciou. Aby sa toto dosiahlo, bolo potrebné použiť sadu modelov niektorých súčiastok zabudovaných v simulačných knižniciach programu *OrCAD*. Sumačné a diferenčné funkcie, zobrazované v simulačnom zapojení, slúžia na porovnávanie a získanie výsledku, na základe ktorého je softvérová regulácia uskutočnená. Po nastavení správnych parametrov na ich chod, je možné zobrazíť priebeh výstupného napätia (obrázok 2.12), kde možno pozorovať prekmit a dĺžku odozvy zmeny výstupu. Odozva je približne 32 ms a s napäťovým prekmitom (*angl. overshoot*) približne 1.5 V, čo vo výsledku pri piatich moduloch je 7 až 8 V. Táto hodnota prekmitu je z hľadiska precíznych napäťových zdrojov neprípustná a dokázala by citlivú elektroniku zničiť. Tento problém je riešiteľný riaditeľnou svorkou, čo by aktívne odpájala a pripájala výstup pri zmene úrovne výstupného napätia na zredukovanie tohto nežiaduceho javu. V prípade tejto aplikácie je prekmit plne tolerovateľný. Napriek tomu praktické aplikovanie a ladenie aktívnej regulácie vo výsledku túto hodnotu prekmitu mení a vďaka viacerým kanálom časovačov mikrokontroléra je spínanie jednotlivých modulov mimo fázy, čo vo výsledku zredukuje napäťový prekmit.



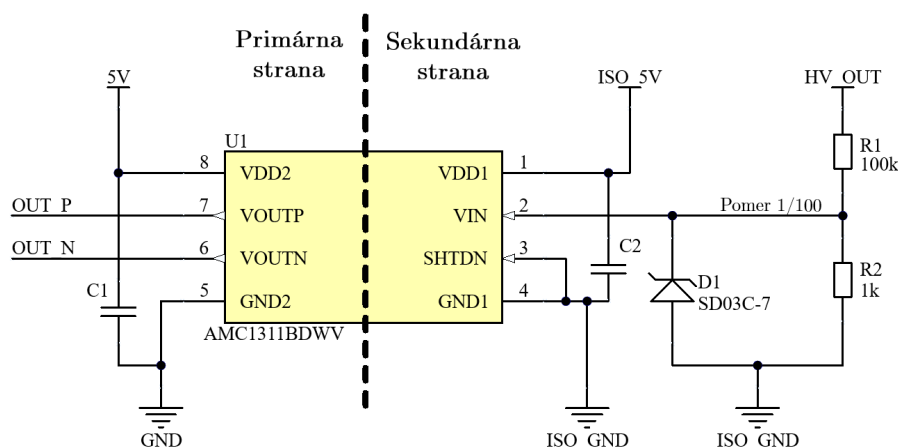
Obr. 2.11: Simulačná schéma regulácie v spojitom režime



Obr. 2.12: Priebeh časovej analýzy ustálenia výstupu na základe aktívnej regulácie

2.7.2 Napäťová regulácia

V kapitole 2.6 bol uvedený integrovaný obvod s izolovaným operačným zosilňovačom určeným na galvanické izolovanie spätnej väzby. Toto izolovanie je dôležité pri napäťovej regulácii, pretože regulácia je realizovaná napäťovým deličom $R1$ a $R2$ priamo na výstupe modulu a tento podiel napätia musí byť prenesený bezpečne na primárnu stranu. Ako je vyobrazené na obrázku 2.13, táto napäťová spätná väzba je privedená z deliča a spracovaná izolovaným operačným deličom na diferenčný signál, ktorý je vyvedený na dátový výstup modulu.

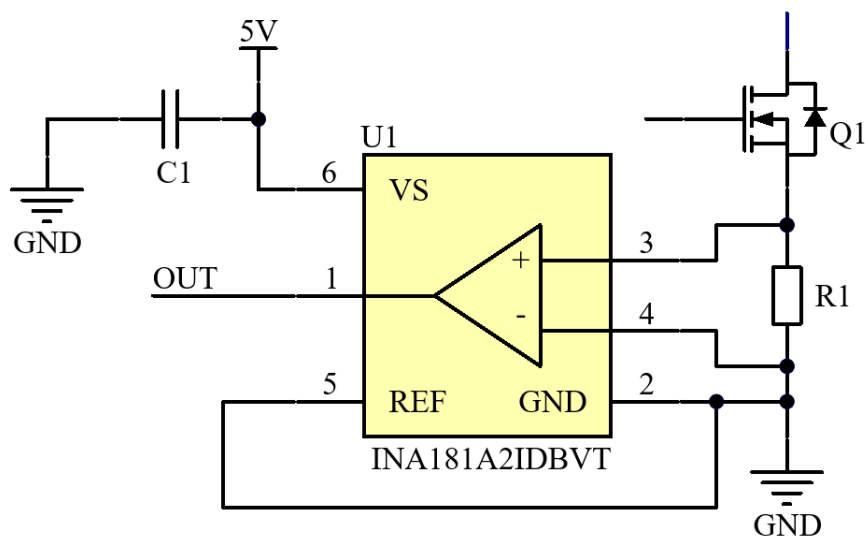


Obr. 2.13: Výrez zapojenia napäťovej regulácie zo schematického listu

Ako schéma na obrázku naznačuje, napäťový delič, slúžiaci na získanie referencie výstupného napätia, je pridaný o diódu slúžiacu na potlačenie, respektíve zamedzenie napäťových skokov nad 4 V. Teda spĺňa funkciu ochrany vstupu izolačného zosilňovača, ktorý zvládne maximálne hodnotu napájacieho napätia. Samotná implementácia napäťovej spätnej väzby na riadiacom module pozostáva z využitia multiplexovacích integrovaných obvodov, ktoré diferenčný signál z jednotlivých modulov privádzajú na externý AD prevodník *ADS122C04IPW*[24] od firmy *Texas Instruments* so štyrmi nezávislými vstupmi. 24-bitový AD prevodník sa vyznačuje vysokým rozlíšením a programovateľným zosilnením, čo poskytuje veľa možností a priestoru pre správne spracovanie a ladenie signálu. Rýchla a spoľahlivá komunikácia s mikrokontrolérom je zabezpečená vďaka I^2C komunikačnému protokolu, ktorým sa vyznačujú takmer všetky mikrokontroléry od firmy *ST*. Primárne riadenie jednotlivých modulov je realizované na základe napäťovej spätnej väzby, z tohto dôvodu je presnosť a dostatočná veľkosť jednotlivých krokov regulácie nevyhnutná, čo možno dosiahnuť vďaka použitiu externého AD prevodníku. Prúdová regulácia, slúžiaci na sekundárne riadenie, využíva interné 12-bitové AD prevodníky, ktoré sú dostatočné, avšak vyznačujú sa nižšou presnosťou a menšou veľkosťou krokovania.

2.7.3 Prúdová regulácia

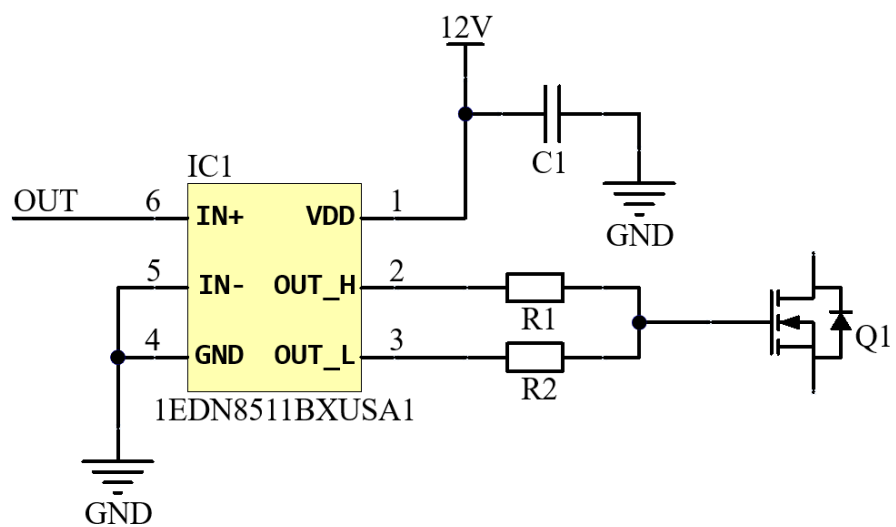
Ako bolo spomenuté v napäťovej regulácii, prúdová regulácia v tejto aplikácii spĺňa vyznám sekundárnej regulácie a prispieva k hlavnej napäťovej regulácii, avšak spĺňa aj nepriamo funkciu prúdovej ochrany jednotlivých modulov. Meranie prechádzajúceho prúdu primárnym vinutím je realizované pomocou operačného zosilňovača na meranie poklesu napätia medzi meracím odporom. Tento integrovaný obvod od firmy *Texas Instruments* s označením *INA181A2IDBVT* [22] a jeho implementácia v tejto aplikácii je zobrazená na obrázku 2.14.



Obr. 2.14: Výrez zapojenia prúdovej regulácie zo schematickeho listu

2.7.4 Ovládanie tranzistora

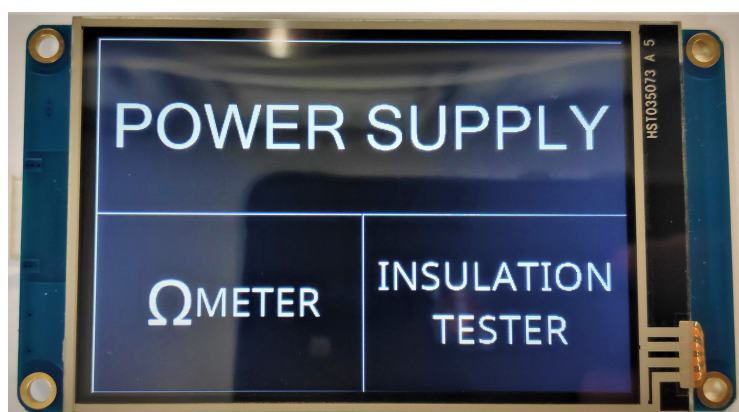
Na základe spätnej väzby jednotlivých modulov a podnetov od užívateľa, tieto informácie mikrokontrolér spracuje a vyhodnotí, čo vyústi k aktívnemu regulovaniu spínacieho obvodu. Regulovanie sa odohráva pomocou generovania PWM signálu pre jednotlivé moduly, kde tento signál putuje na vstup integrovaného obvodu slúžiaceho na ovládanie hradla MOSFETu. Pre túto aplikáciu bol použitý integrovaný obvod od firmy *Infineon* s označením *1EDN8511BXUSA1*[23]. Vyznačuje sa rôznymi ochrannými prvkami a nízkonapäťovým automatickým obmedzovačom na redukcii nadbytočného stratového výkonu. Interné zapojenie spolu s kombináciou externých rezistorov *R1* a *R2*, ako je na obrázku 2.15, umožňuje precízne ladenie zapnutého a vypnutého časového intervalu daného spínacieho MOSFETu. Toto poskytuje veľkú flexibilitu pri voľbe tranzistora, pretože je možné naladiť čas náběžnej a zostupnej hrany bez nutnosti výmeny celého integrovaného obvodu.



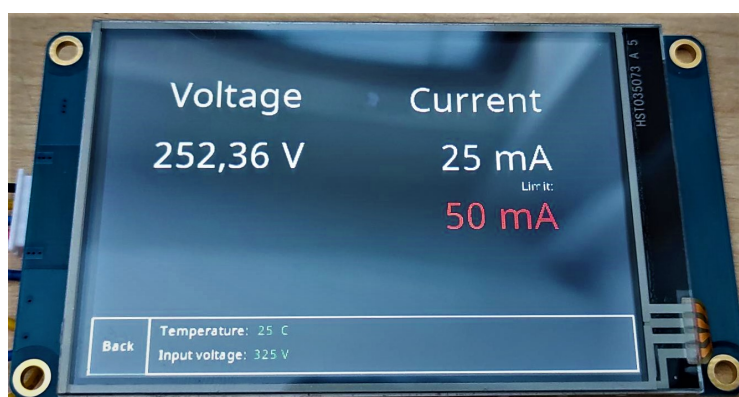
Obr. 2.15: Výrez zapojenia ovládacieho obvodu spínacieho prvku zo schematického listu

3 Realizácia zariadenia

Komponenty a súčiastky z hľadiska nevyhnutnosti pre funkciu zariadenia, ako napríklad transformátor, regulačné prvky a ďalšie súčiastky spomenuté v predošlých kapitolách, tvoria samotný obvod zariadenia, ktorý je ale nekompletný bez externých komponentov prispievajúcich k funkcii a správne chodu zariadenia. Príkladom sú enkóдеры s tlačidlom na nastavovanie výstupného napätia a prúdu, výstupné vysokonapäťové konektory a taktiež rozmerovo primeraný kvalitný dotykový LCD displej.



Obr. 3.1: LCD displej s grafickým užívateľským rozhraním - menu



Obr. 3.2: LCD displej s grafickým užívateľským rozhraním - zdroj

Tieto komponenty poskytujú užívateľovi potrebné prostriedky na ovládanie a využívanie funkcií zariadenia. Ako obrázky 3.1 a 3.2 naznačujú, užívateľské rozhranie je základom pre jednoduché ovládanie zariadenia a prehľadné čítanie výstupných hodnôt jednotlivých funkcií. Okrem základnej funkcie napájania je požiadavka

na zariadenie obsahovať taktiež funkcie Ω - **meter** a **tester izolácie**. Princíp týchto funkcií je softvérový, a teda užívateľ si zvolí funkciu odporu a mikrokontrolér nastaví najvyššie možné napätie a pomocou merania odoberaného prúdu záťažou dopočíta odpor danej záťaže a zobrazí hodnotu. V prípade testovania izolácie je priložené napätie pomaly zvyšované na maximálnu hodnotu a mikrokontrolér sleduje moment začiatku odoberania prúdu, čo zastaví meranie a vypíše dosiahnutý odpor. Ak mikrokontrolér žiaden prúd nezachytí, znamená to že izolácia je dostatočná v rámci limitu zariadenia.

3.1 Návrh a výroba DPS

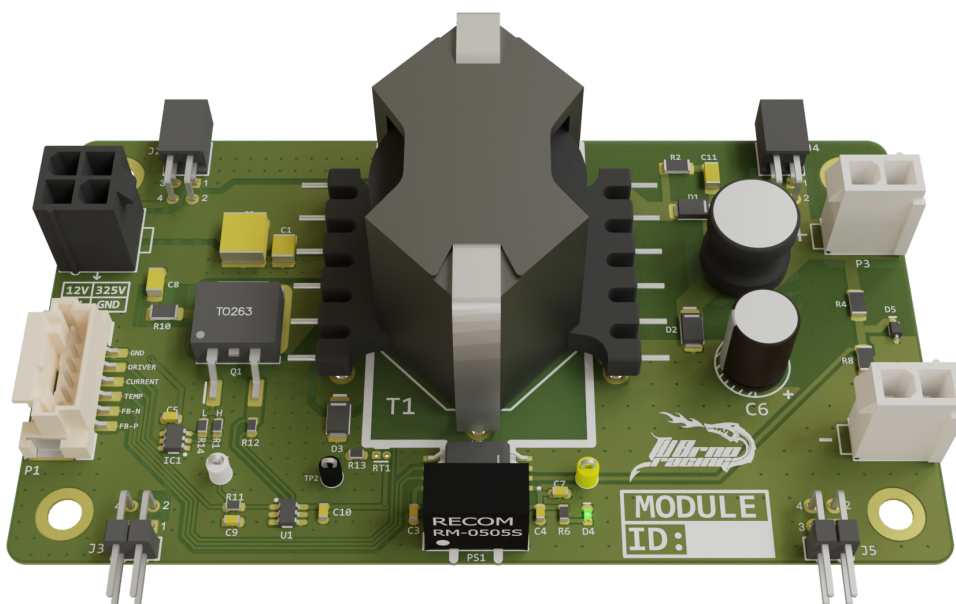
Návrhy DPS sa v tejto práci vyznačujú svojou špecifickosťou, pretože každý z navrhovaných modulov obsahuje vysoké napätie, izolačné bariéry a taktiež signálové cesty. Z dôvodu tvorby bežných 2-vrstvových DPS sa komplexnosť návrhov o to viac prejavuje. Vďaka českej firme *Gatema* bolo možné jednotlivých DPS realizovať a zvoliť vhodne parametre výroby, teda hrúbku medenej vrstvy, typ materiálu substrátu a taktiež celkovú veľkosť a hrúbku DPS. Vďaka použitému programu *Altium Designer 21.3.2* bolo možné zrealizovať návrhy na profesionálnej úrovni a vďaka zabudovaným funkciám dodržiavať rozličné návrhárske pravidlá pre bezchybný a spoľahlivý návrh.

3.2 Segmenty zariadenia

Ako bolo vyobrazené na obrázku 2.1, koncept zariadenia sa skladá zo sady výkonových modulov, riadiaceho modulu a prídavného výstupného modulu, ktorý zabezpečuje precíznejšie finálne meranie. Celkový fakt, že zariadenie je rozdelené na 3 časti umožňuje veľkú flexibilitu rozloženia, kombinovania a implementácie, čo môže byť potencionálna motivácia kupujúceho v prípade väčšej produkcie a predaja.

3.2.1 Výkonový modul

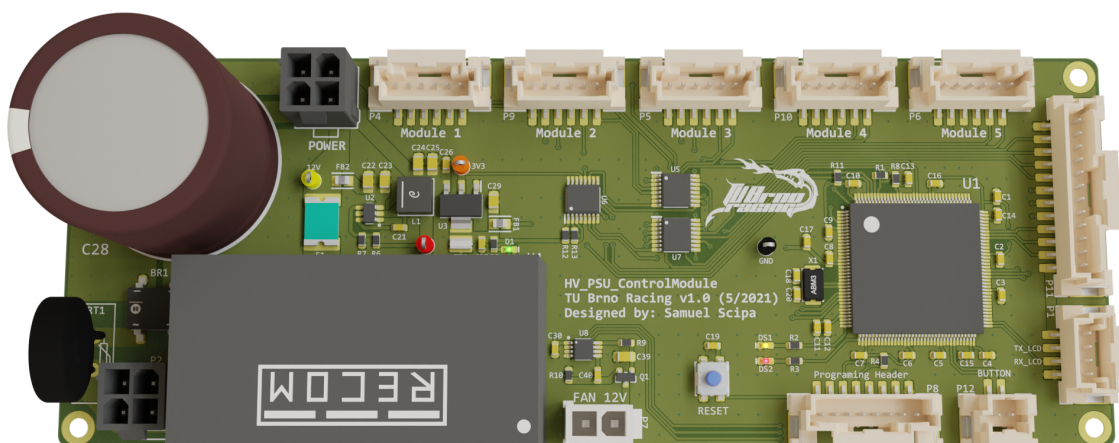
Samotný výkonový modul o rozmeroch 107x60 mm, pozostáva zo spínacieho tranzistora a jeho hradlového budiča, ručne vinutého transformátora, napäťovej a prúdovej spätnej väzby, výstupného LC filtra. Na obrázku 3.3 možno vidieť reťazové konektory na krajoch DPS, určené na prepájanie a reťazenie viacerých modulov. Schémy zapojenia spolu s jednotlivými vrstvami DPS výkonového modulu sa nachádzajú v prílohe A.



Obr. 3.3: Grafické vyobrazenie návrhu výkonového modulu

3.2.2 Riadiaci modul

Návrh DPS riadiaceho modulu o rozmeroch 160x60 mm, pozostáva z výkonového obvodu na usmernenie napájania, napäťových prevodníkov na 12 V, 5 V a 3.3 V potrebných na napájanie jednotlivých súčiastok, mikrokontroléra, A/D prevodníkov a množstva konektorov na pripojenie vstupných periférií (LCD, enkóдеры, tlačidlo) a jednotlivých výkonových modulov ako je vyobrazené na obrázku 3.4.

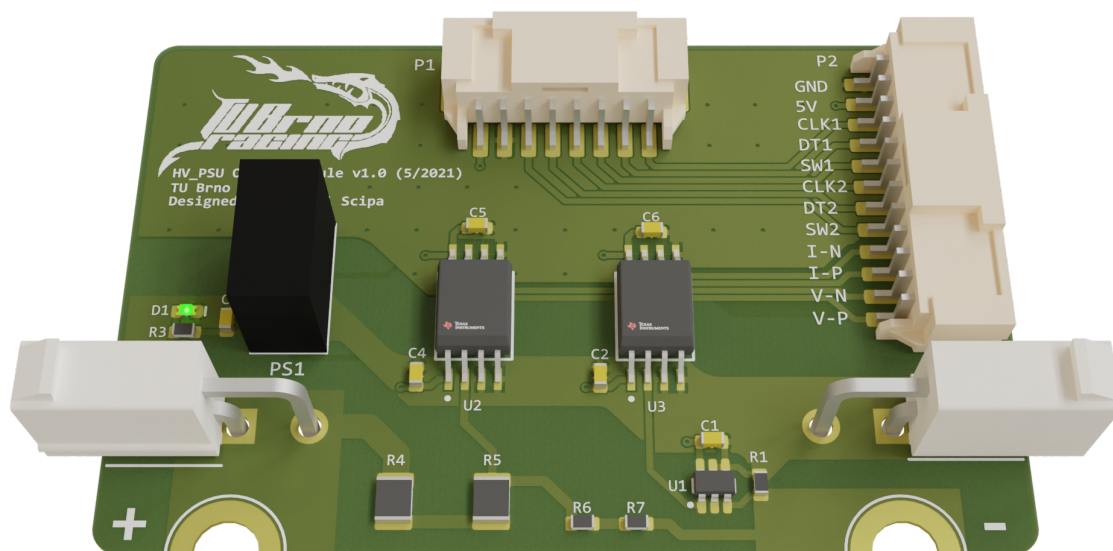


Obr. 3.4: Grafické vyobrazenie návrhu riadiaceho modulu

Podrobné schémy zapojenia a jednotlivé vrstvy DPS riadiaceho modulu sa nachádzajú v prílohe B.

3.2.3 Výstupný modul

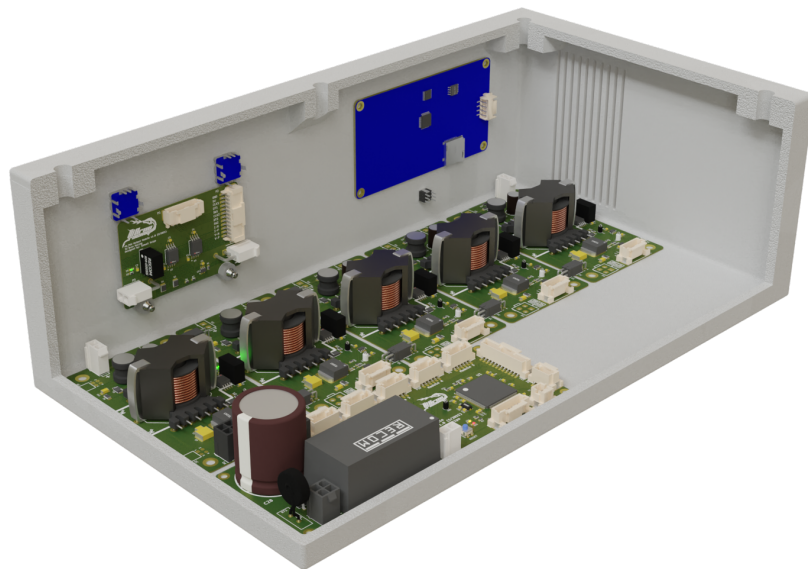
Z hľadiska presnosti a možnosti zobrazovať presné hodnoty celkového výstupného napätia a prúdu, je nutné ich odmerať. Výstupný modul v podstate slúži ako spôsob uchytienia meracích obvodov a taktiež spĺňa funkciu organizéra príslušných privedených vodičov. Skladá sa z meracej časti, izolovanej od sekundárnej strany, a prepojenia pre enkodéry. Navrhnutý tvar DPS, s rozmermi 70x45 mm, umožňuje pohodlné uchytienie priamo na výstupné konektory samotného zdroja, ako je naznačené na obrázku 3.5. Schéma zapojenia, spodná a horná vrstva DPS výstupného modulu je priložená v prílohe C.



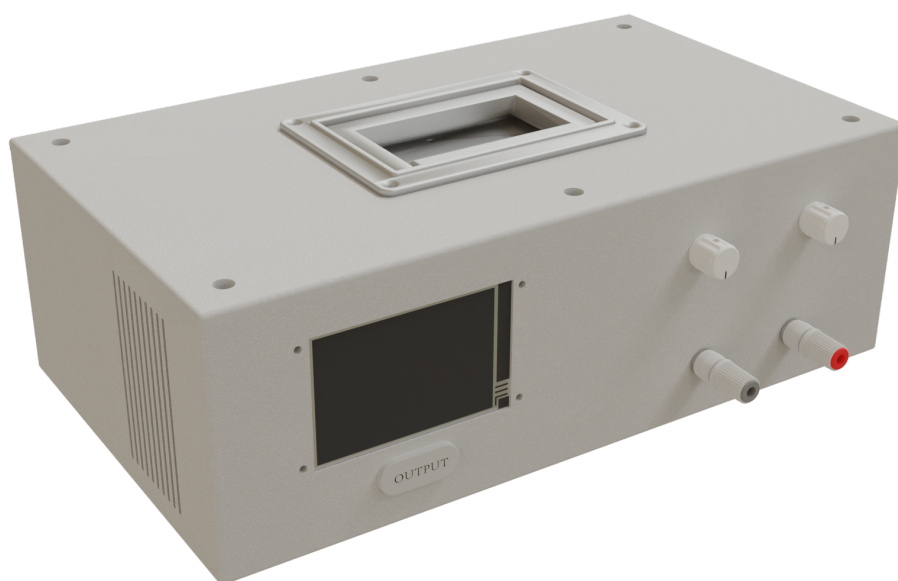
Obr. 3.5: Grafické vyobrazenie návrhu výstupného modulu

3.3 Prototyp zariadenia

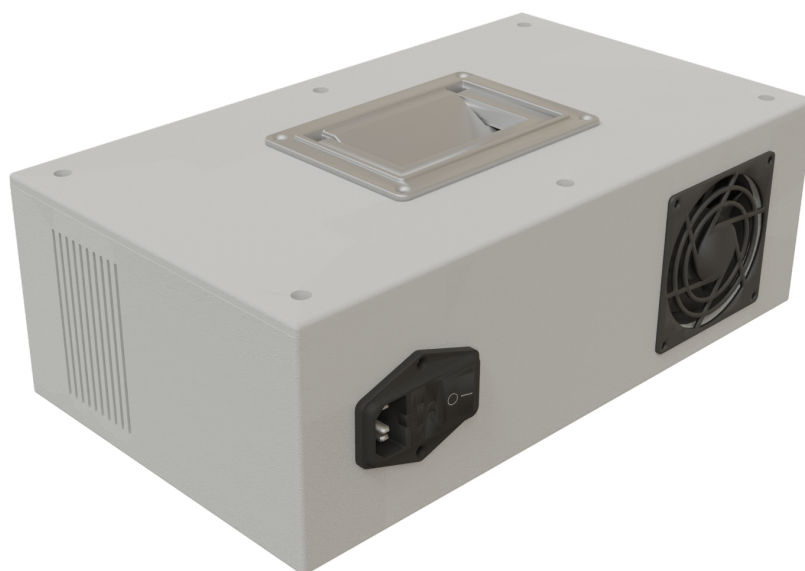
Finálna reprezentácia zariadenia je zobrazená na obrázkoch 3.6, 3.7 a 3.8 v podobe grafickej vizualizácie. Odolné telo bolo vyrobené z ABS plastu o rozmeroch 330x190x110 mm, a uchytením všetkých komponentov zariadenia na špecifických miestach. Váhová a rozmerová kompaktnosť navrhovaného zariadenia s kombináciou sklápateľnej rúčky umožňuje jednoduchý prenos a pohodlné umiestnenie do pracoviska. Celková realizácia zariadenia z cenového hľadiska pri zarátaní cien všetkých komponentov, súčiastok, DPS jednotlivých modulov, vychádza približne 370 €, bez ceny práce a materiálových nákladov na výrobu tela zariadenia. V prípade sériovej výroby finálneho zariadenia, je cenový odhad približne 1000 €, čo je kompetitívna cena v porovnaní s konkurenciou z hľadiska ceny a funkcionality zariadenia.



Obr. 3.6: Grafické vyobrazenie vnútorného usporiadania 3D modelu zariadenia



Obr. 3.7: Grafické vyobrazenie 3D modelu zariadenia z prednej strany



Obr. 3.8: Grafické vyobrazenie 3D modelu zariadenia zo zadnej strany

Záver

Hlavnou náplňou práce bol návrh a realizácia spínaného laboratórneho zdroja určeného na napájanie a testovanie rozličných zariadení a prototypov pri návrhu a stavbe študentskej elektrickej formuly. Zariadenie je založené na topológii jednočinného priepustného meniča modulárneho typu. Modulárnosť zariadenia umožňuje flexibilitu implementácie a taktiež možnosť zmeny maximálneho výstupného napätia. Koncept zariadenia je zložený z troch rozličných typov modulov a to z riadiaceho, výkonového a výstupného modulu. Na základe opisovanej konfigurácie zariadenia v práci je hodnota maximálneho regulovateľného výstupného napätia 1000 V a taktiež regulovateľného maximálneho odoberaného prúdu 100 mA. Okrem napájacej funkcie sa zariadenie vyznačuje softvérovými funkciami umožňujúcimi meranie veľkého odporu a taktiež testovanie izolácie voči prieraznému napätiu.

Bakalárska práca sa v úvode zameriava na teoretický rozbor problematiky návrhu a realizácie spínaných zdrojov s galvanickým oddelením, porovnáva jednotlivé spínané meniče, rozoberá napájanie zariadenia a dôležitosť faktorovej korekcie a taktiež rozoberá vo všeobecnosti ďalšie časti spínaných zdrojov, ako transformátor a regulácia výstupného napätia, ktoré sú nevyhnutné pre správnu funkčnosť zariadenia.

V ďalšej časti práca rozoberá návrh konceptu a samotné výpočty nevyhnutné pre realizáciu zariadenia. Táto časť sa zameriava na výber vhodných súčiastok, dimenzovanie sieťového napájania a spínacieho tranzistora, návrh vstupného a výstupného filtra, návrh transformátora a výpočet stratového výkonu na zvolených súčiastkách. V tejto časti je taktiež rozobratá regulácia jednotlivých modulov a riadenie z hľadiska implementácie softvérovej regulácie. Princíp regulácie je overený na základe spojenej simulácie funkčných blokov. Cieľom bolo overiť funkčnosť a chovanie výstupného napätia pri dynamických korekčných zmenách a získať prenosovú funkciu na implementáciu do mikrokontroléra.

Realizácia zariadenia v tejto práci prebehla formou návrhu schematického zapojenia, návrhu DPS jednotlivých modulov a 3D vizualizáciou pomocou rôznych grafických techník. Fyzická realizácia si vyžaduje ešte ďalší vývoj, podrobnejšie testovanie jednotlivých modulov a taktiež zariadenia ako celku. Softvérová stránka nie je náplňou práce, avšak vyžaduje si intenzívny vývoj a ladenie hardvéru na dosiahnutie bezchybnej užívateľskej skúsenosti a flexibility z hľadiska modulárnosti.

Literatúra

- [1] HOROWITZ, Paul a Winfield HILL. The Art of Electronics. Cambridge University Press, 15th printing 2019. United Kingdom: TJ International Ltd. Padstow Cornwall, 2019. ISBN 978-0-521-80926-9.
- [2] TU Brno Racing: FORMULA STUDENT [online]. 2020 [cit. 15. 12. 2020]. Dostupné z: <https://tubrnoracing.cz/o-nas/formula-student/>
- [3] BILLINGS, Keith a Taylor MOREY. *SWITCHMODE POWER SUPPLY HANDBOOK*. Third Edition. USA: The McGraw-Hill Companies, 2011. ISBN 978-0-07-163972-9.
- [4] DAVIS, Nick. Safety Capacitors First: Class-X and Class-Y Capacitors. All About Circuits [online]. 2019 [cit. 2020-12-16]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/safety-capacitor-class-x-and-class-y-capacitors/>
- [5] AN1114 - Switch Mode Power Supply (SMPS) Topologies (Part I) [online -PDF], 2007, Mohammad Kamil, Microchip Technology Inc. [cit. 25-11-2020] Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01114A.pdf>
- [6] Power Supply Design Basics: The Power Factor. NUATION ENGINEERING [online]. California: Nuvation, 1997, 16.7. 2013 [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: <https://www.nuvation.com/resources/article/power-supply-design-basics-power-factor>
- [7] SVAČINA, Jiří. Základy elektromagnetické kompatibility: Prednášky. Dotisk. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií: MJ Servis, 2005. ISBN 80-214-2864-3.
- [8] Differential (Normal) Mode Noise and Common Mode Noise. Tech Web [online]. ROHM Co., 1997, 2018 [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: <https://techweb.rohm.com/knowledge/emc/s-emc/01-s-emc/6899>
- [9] DONTIGNEY, Eric. How an EMI Filter Works. SCIENCING [online]. Leaf Group, 2020, April 24, 2017 [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: <https://sciencing.com/emi-filter-works-5595876.html>
- [10] BIRD, John. Electrical and Electronic Principles and Technology. Fifth edition. Milton Park, Abingdon, Oxon: Routledge, 2014. ISBN 978-0-415-66285-7.
- [11] MONK, Simon. Practical electronics for inventors. Fourth edition. New York: McGraw-Hill Education, [2016]. ISBN 978-1-25-958754-2.

- [12] PATOČKA, Miroslav. Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice. V Brně: VUTUM, 2011. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [13] Datasheet : B65815E0000R097. EPCOS AG. TDK Group Company, 2016. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/2133267.pdf>
- [14] Datasheet : STB36N60M6. STMicroelectronics. Mouser Electronics, 2017. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/389/dm00155056-1798347.pdf>
- [15] BETTEN, John. R-C snubber: R-C snubber calculation. In: Texas Instruments [online]. TI forum, 5.5.2016 [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: https://e2e.ti.com/blogs_/b/powerhouse/posts/calculate-an-r-c-snubber-in-seven-steps
- [16] Folprecht, M. Síťový spínaný zdroj.Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 76s. Vedúci diplomové práce:doc. Dr. Ing. Miroslav Patočka
- [17] Datasheet : DF10S2 Bridge Rectifier. ON Semiconductor, 2015. Dostupné z: <https://datasheet.ciiva.com/pdfs/VipMasterIC/IC/ONSM/ONSM-S-A0003590120/ONSM-S-A0003584401-1.pdf?src-supplier=IHS+Markit>
- [18] Datasheet : FFSAS04BFR - IEC Power Entry Inlet with Line Filter. XP Power. Mouser Electronics, 2021. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/942/SF_FFSA-2065585.pdf
- [19] Datasheet : RF071LAM4S. ROHM Semiconductor. Mouser Electronics, 2017. Dostupné z: <https://datasheet.ciiva.com/pdfs/VipMasterIC/IC/ROHM/ROHM-S-A0003699680/ROHM-S-A0003699680-1.pdf?src-supplier=IHS+Markit>
- [20] Datasheet : AMC1311BDWV. Texas Instruments. Texas Instruments Incorporated, 2020. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/amc1311.pdf?src-supplier=IHS+Markit>
- [21] Datasheet : STM32F413ZHT6. STMicroelectronics, 2017. Dostupné z: <https://datasheet.ciiva.com/pdfs/VipMasterIC/IC/SGST/SGST-S-A0003533273/SGST-S-A0003533273-1.pdf?src-supplier=IHS+Markit>

- [22] Datasheet : INA181A2IDBVT. Texas Instruments. Texas Instruments Incorporated, 2020. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina181.pdf?src-supplier=IHS+Markit>
- [23] Datasheet : 1EDN8511BXUSA1. Infineon Technologies AG. Munich, Germany, 2017. Dostupné z: <https://datasheet.ciiva.com/pdfs/VipMasterIC/IC/INFN/INFN-S-A0003615096/INFN-S-A0003615096-1.pdf?src-supplier=IHS+Markit>
- [24] Datasheet : ADS122C04. Texas Instruments. Texas, 2018. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads122c04.pdf?ts=1621783600583&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fstore%252Fti%252Fen%252Fp%252Fproduct%252F%253Fp%253DADS122C04IPWR
- [25] Demystifying Type II and Type III Compensators Using OpAmp and OTA for DC/DC Converters. Texas Instruments. Texas Instruments Incorporated, 2014. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/slva662/slva662.pdf?ts=1620296206344>
- [26] ČSN EN 61000-4-31. Elektromagnetická kompatibilita (EMC): Část 4-31: Zkušební a měřicí technika. Česká technická norma (ČSN). Praha: Český normalizační institut, 2017.
- [27] ČSN EN 60939-2. Pasivní filtry pro elektromagnetické odrušení. Česká technická norma (ČSN). Praha: Český normalizační institut, 2005.

Zoznam symbolov a skratiek

A	Prierez jadra
ABS	Amorfný termoplastický priemyslový polymer - (angl. Acrylonitrile Butadiene Styrene)
AC	Striedavý prúd - (angl. alternating current)
ADC	Analógovo digitálny prevodník
AD	Analógovo digitálne
A_e	Efektívny prierez jadra
A_L	Indukčný faktor
A_{min}	Minimálny prierez jadra
A_N	Prierez vinutia
B	Magnetická indukcia
B_{max}	Maximálna hodnota magnetické toku jadra
C	Kondenzátor
C_u	Symbol medi v periodickej tabuľke prvkov
C_X	Ochranný kondenzátor triedy X
C_Y	Ochranný kondenzátor triedy Y
D_1	Označenie diódy
DC	Jednosmerný prúd - (angl. direct current)
DPS	Doska plošných spojov
EMC	Elektromagnetická kompatibilita - (angl. electromagnetic compatibility)
EMI	Elektromagnetické rušenie - (angl. electromagnetic interference)
f	Frekvencia
f_0	Rezonančný kmitočet filtru
GND	Elektrické uzemnenie

HV	Vysoké napätie - (angl. high voltage)
I	Všeobecné označenie prúdu
I_D	Maximálny prúd tranzistorom udávaný výrobcom
I_d	Prúd usmerňovačom
i_{DS}	Okamžitá hodnota prúdu
$I_{DS,ef}$	Efektívny prúd tranzistora
$I_{DS,max}$	Maximálny prúd tranzistora
$I_{DS,str}$	Stredný prúd tranzistora
$IGBT$	Tranzistor - (angl. insulated-gate bipolar transistor)
I_Z	Vstupný prúd do záťaže
I_L	Prúd induktorom
I_{RMS}	Efektívny prúd z usmerňovača
I_N	Vstup
I_{OUT}	Celkový výstupný prúd
$I_{out,module}$	Výstupný prúd jedného výkonového modulu
I_P	Prúd primárnym vinutím
I_{ripple}	Zvlnenie prúdu
I_S	Prúd sekundárnym vinutím
I_Z	Prúd do záťaže
k	Konštanta
L	Induktor
LCD	Obrazovka - (angl. liquid crystal display)
LED	Elektroluminescenčná dióda - (angl. light-emitting diode)
l_N	Dĺžka jedného vinutia
L_P	Indukčnosť primárneho vinutia

L_S	Indukčnosť sekundárneho vinutia
m	Pomer posunutia
$MOS - FET$	Tranzistor typu MOS - (angl. metal oxide field effect tranzistor)
N_P	Primárne vinutie transformátora
N_R	Demagnetizačné vinutie transformátora
N_S	Sekundárne vinutie transformátora
NTC	Negatívny teplotný koeficient - (angl. negative temperature coefficient)
OOK	Zapínanie a vypínanie kľúčovania modulačnej schémy - (angl. on-off keying)
OUT	Výstup
P	Všeobecné označenie výkonu
PF	Účinník - (angl. power factor)
PFC	Regulátor účinníka - (angl. power factor correction)
PID	Proporcionálne integračno-derivačná riadiaca teória
P_{out}	Celkový výstupný výkon
P_R	Stratový výkon odporu v obvode RC snubber
P_{str}	Stratový výkon tranzistora
$P_{str, celk}$	Celkový stratový výkon tranzistora
$P_{str, p}$	Stratový prepínací výkon
P_T	Prenášaný výkon transformátora
PWM	Pulzná šírková modulácia - (angl. pulse width modulation)
P_Z	Stratový výkon usmerňovača
q	Počet polvln
Q_1	Označenie spínacieho prvku
R	Všeobecné označenie odporu

$R_{DS(on)}$	Statický odpor tranzistora
R_d	Diferenciálny odpor diódy
RMS	Efektívna hodnota prúdu - (angl. root mean square)
RX	Prijímanie signálu
R_Z	Označenie záťaže
s	Strieda signálu
$SMPS$	Spínací napájací zdroj - (angl. switch mode power supply)
T	Periódá signálu
$t_{d(on)}$	Doba oneskorenia zapnutia tranzistora
$t_{d(off)}$	Doba oneskorenia vypnutia tranzistora
T	Periódá signálu
t_f	Čas zostupnej hrany
T_{ON}	Periódá zapnutého stavu tranzistora
T_{OFF}	Periódá vypnutého stavu tranzistora
t_r	Čas nábežnej hrany
$t_{response}$	Časova odozva
T_S	Spínacia periódá
TX	Odosielanie signálu
U	Všeobecné označenie napätia
U_0	Prahové napätie diódy
U_a	Maximálna hodnota fázového napätia
U_d	Výstupné napätie z usmerňovača
u_{DS}	Okamžitá hodnota napätia
U_{DSS}	Prierazné napätie tranzistora
U_f	Vstupné fázové napätie

U_{GS}	Napätie medzi elektródou G a S
$U_{GS(th)}$	Prahové napätie
U_{IN}	Vstupné napätie
U_L	Napätie na induktore
U_{OUT}	Celkové výstupné napätie
$U_{out,module}$	Výstupné napätie modula
U_P	Napätie na primárnom vinutí
U_{peak}	Maximálna hodnota výstupného napätia za sekundárnym usmerňovacom
U_{ripple}	Napäťové zvlnenie
U_S	Napätie na sekundárnom vinutí
VF	Vysoká frekvencia
Δt	Vybíjacia doba kondenzátora
Ω	Uhlová rýchlosť
ΔU	Pokles napätia na kondenzátore
Φ	Magnetický tok
η	Efektívnosť
δ	Hĺbka povrchu vodiča - (angl. skin depth)
ρ	Rezistivita vodiča
μ_0	Permeabilita vákua (vzduchu)
μ_r	Relatívna permeabilita
μ_e	Efektívna permeabilita jadra

Zoznam príloh

A	Výkonový modul	69
B	Riadiaci modul	74
C	Výstupný modul	81

A Výkonový modul

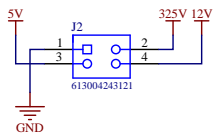
Tab. A.1: Zoznam použitých súčiastok v návrhu DPS výkonového modulu

Názov	Popis	Množstvo [-]	Cena [€/ks]
1EDN8511BXUSA1	MOSFET Driver	1	0.80
5001 (Black)	Test Point, Black	1	0.29
5002 (White)	Test Point, White	1	0.29
5004 (Yellow)	Test Point, Yellow	1	0.32
6100-222K-RC	2200uH	1	0.60
87427-0242	2-pin	2	0.62
560020-0620	6-pin	1	0.74
462071004	4-pin	1	1.68
61300421021	4-pin	2	0.51
613004243121	4-pin	2	1.22
AMC1311BDWV	Isolated OP Amp	1	7.20
B65816C1512T001	Core	1	1.17
C0603C104K5RACAUTO	100nF	5	0.11
C0603C105M8PACTU	1uF	1	0.22
C1210C104KBRACAUTO	0.1uF	1	0.36
CGA9P4X7T2W105K250KE	1uF	1	0.25
CRCW06031K00FKEA	1k	1	0.04
CRCW06034R70FKEA	4R7	1	0.08
CRCW060310K0FKEA	10k	1	0.04
CRCW06030000Z0EBC	0R	2	0.08
ERJ3RQFR30V	300mR	1	0.23
ESE105M450AG3AA	1uF	1	0.25
GRM31A5C2H150JW01D	15pF	2	0.27
HRG3216P-1001-B-T1	1k	1	0.92
HRG3216P-1003-B-T1	100k	1	0.92
INA181A2IDBVT	OP Amp	1	0.44
LTST-C190KGKT	Green LED	1	0.11

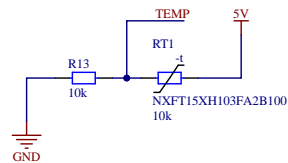
Tab. A.2: Pokračovanie zoznamu použitých súčiastok v návrhu DPS výkonového modulu

Názov	Popis	Množstvo [-]	Cena [€/ks]
NXFT15XH103FA2B100	NTC Thermistor	1	0.81
PNM1206E5001BST5	5k	1	1.09
RCS1206100RJNEA	100R	1	0.2
RFM-0505S	DC/DC	1	1.22
Schottky Diode	Rectifier Diode	3	0.31
SD03C-7	TVS Diode	1	0.30
STB36N60M6	MOSFET	1	3.30
Suma			30.75€

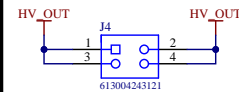
Chain Connector (F)



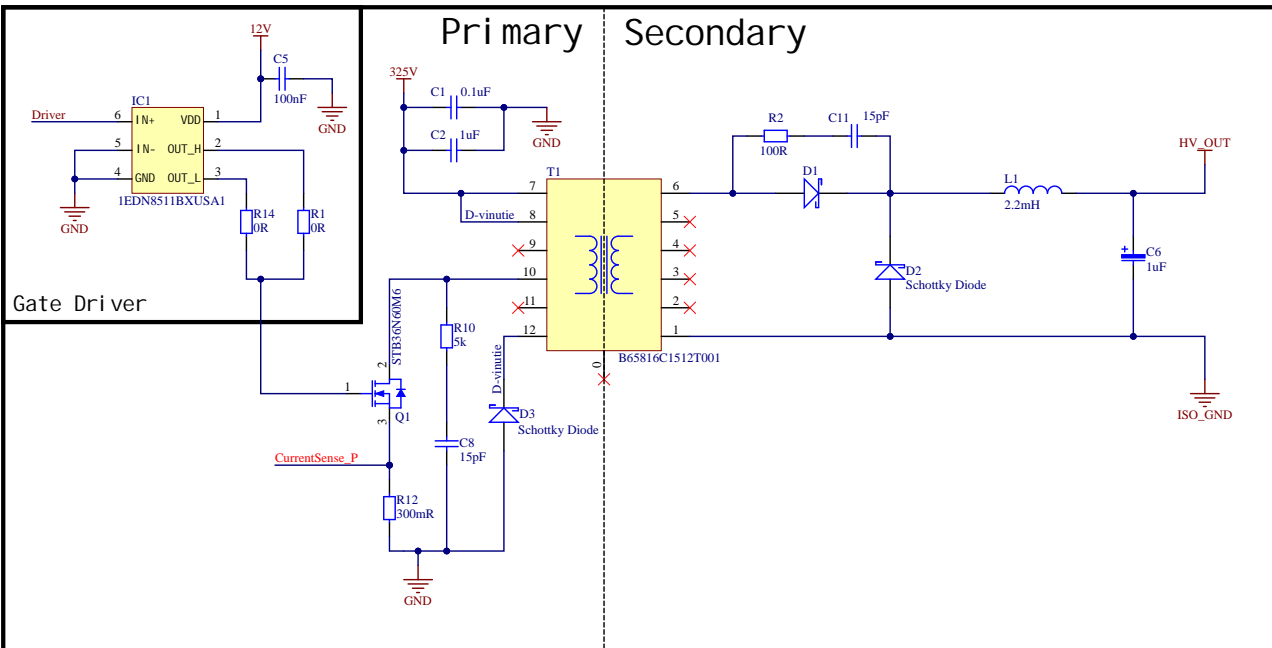
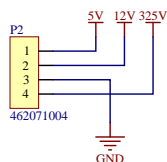
Temperature measuring



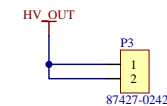
Chain Connector (F)



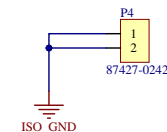
POWER connector



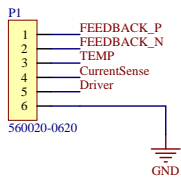
Output Connectors



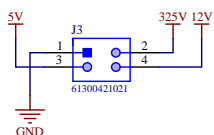
Solder only one of these connectors and only on one side of module for chained outputs.



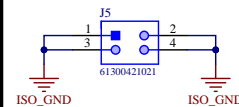
Data connector




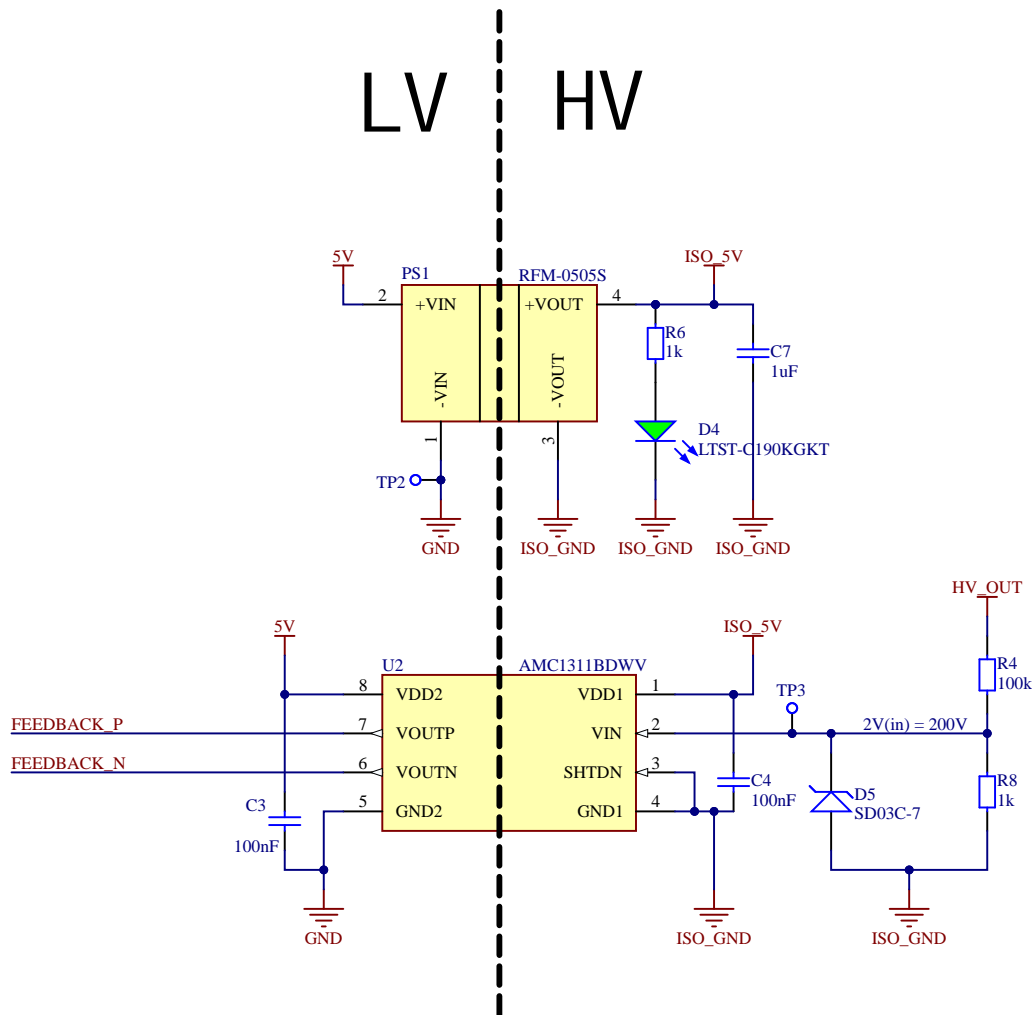
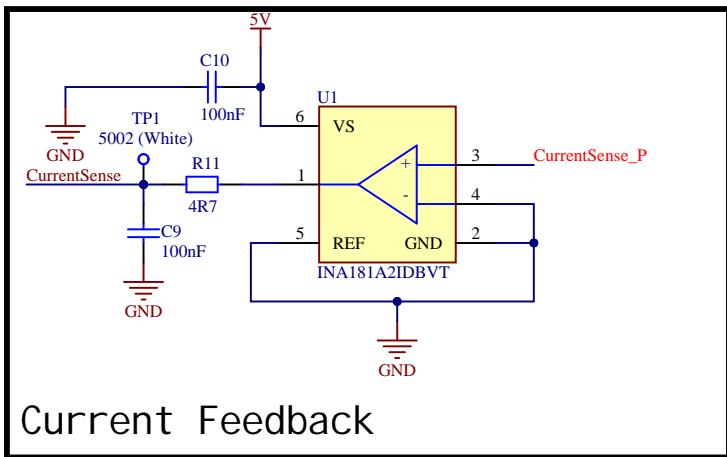
Chain Connector (M)




Chain Connector (M)

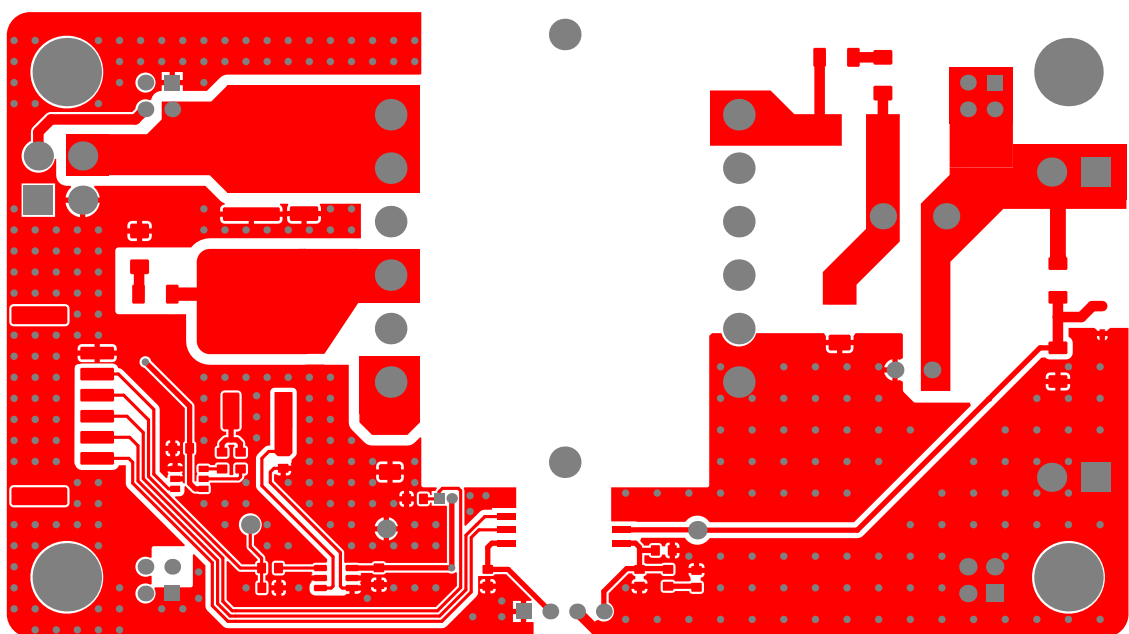


Title: HV_stage			VUT - TU Brno Racing Technická 2896/2, Brno Czech Republic		
Project: HV_PSU_PowerModule			Drawn by:	Checked by:	
			Samuel Ščipa	-	
Car: -	Date: 20-May-21				
Sheet 1/2	Rev. B	Format A3	Contact: scipa@tubnracing.cz		

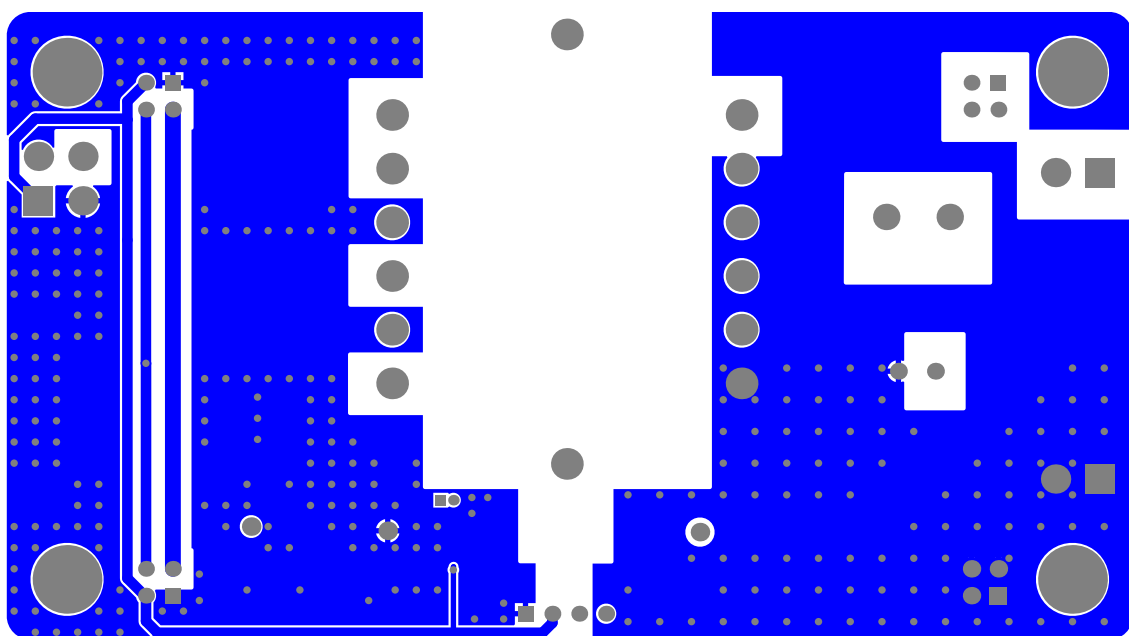


Isolated Voltage Feedback

Title: Feedback			VUT - TU Brno Racing Technicka 2896/2, Brno Czech Republic		
Project: HV_PSU_PowerModule		Drawn by: Samuel Ščipa		Checked by: -	
Car: -	Date: 20-May-21				
Sheet 2/2	Rev. B	Format A4		Contact: scipa@tubnoracing.cz	



Obr. A.1: Pohľad na hornú vrstvu výkonového modulu



Obr. A.2: Pohľad na spodnú vrstvu výkonového modulu

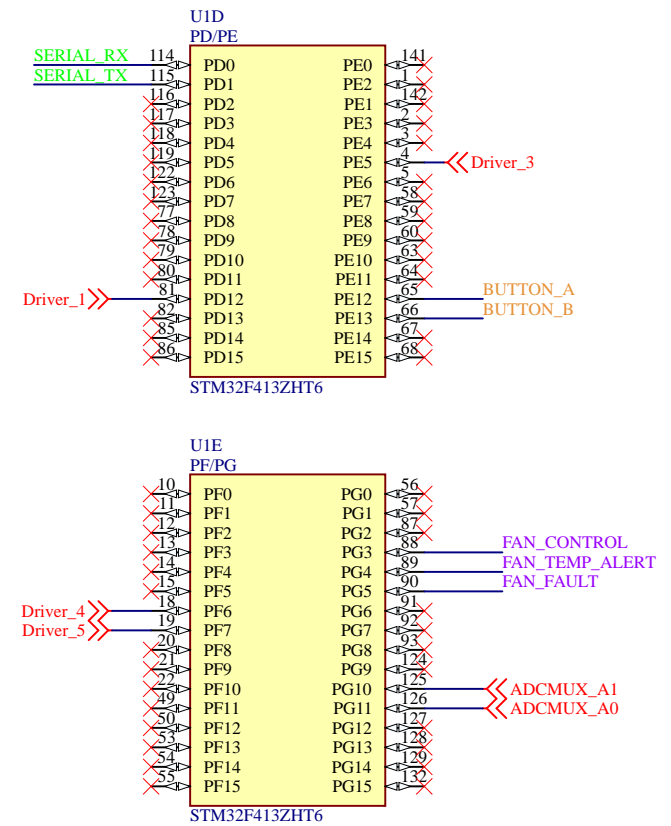
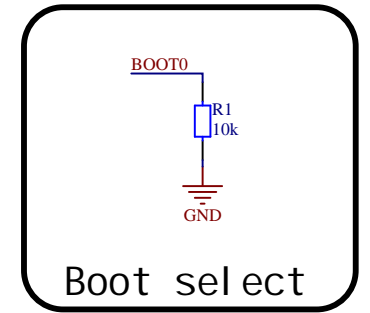
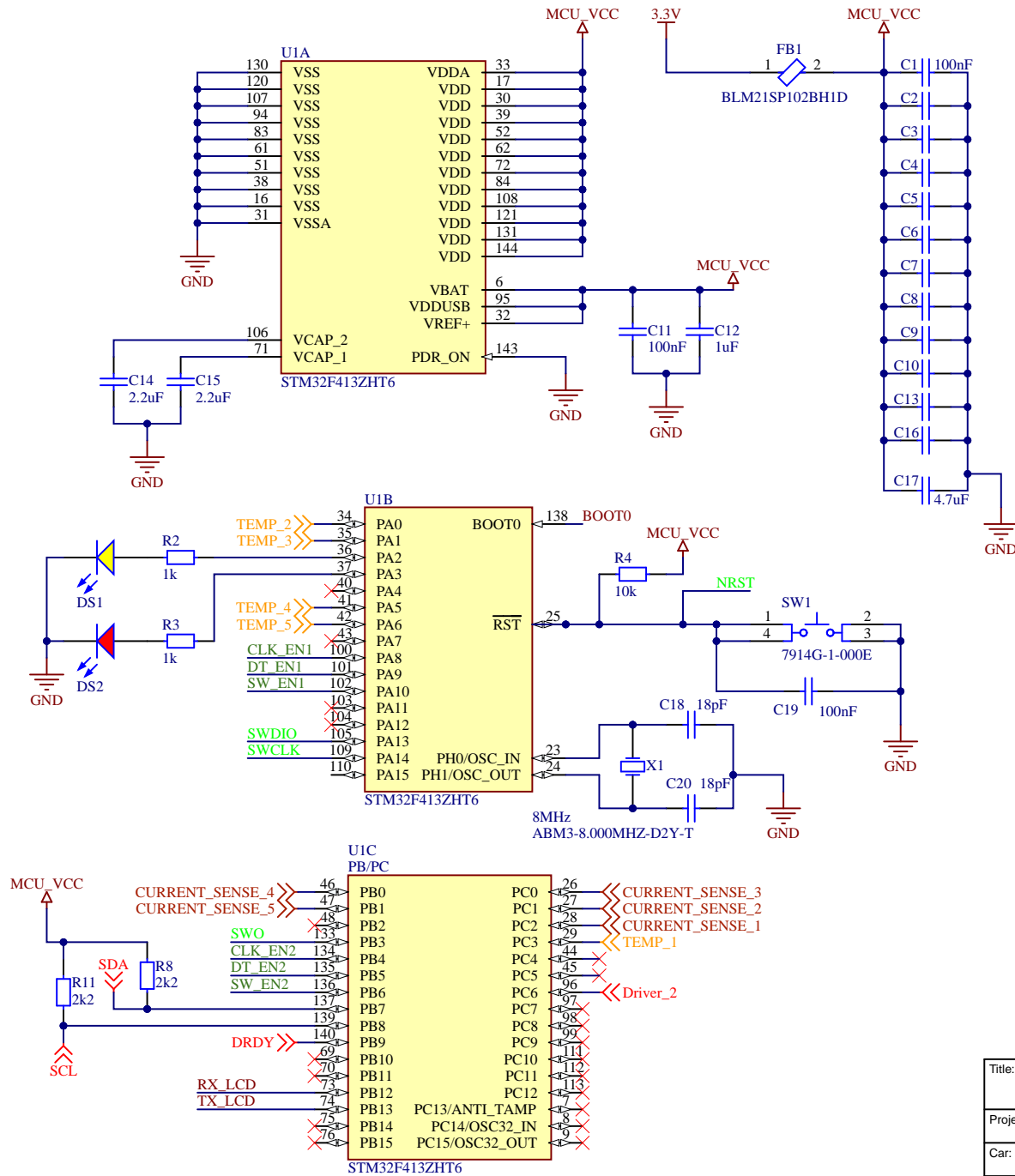
B Riadiaci modul

Tab. B.1: Zoznam použitých súčiastok v návrhu DPS riadiaceho modulu

Názov	Popis	Množstvo [-]	Cena [€/ks]
5000 (Red)	Test Point, Red	1	0.287
5001 (Black)	Test Point, Black	1	0.287
5003 (Orange)	Test Point, Orange	1	0.287
5004 (Yellow)	Test Point, Yellow	1	0.345
7914G-1-000E	Switch	1	0.665
87427-0242	2-pin	1	0.624
560020-0220	2-pin	1	0.616
560020-0420	4-pin	1	1.300
560020-0620	6-pin	5	0.862
560020-1220	12-pin	1	1.440
462071004	4-pin	2	1.680
ABM3-8.000MHZ-D2Y-T	Crystal 8 MHz	1	0.870
ADS122C04IPW	ADC, Delta-Sigma	1	8.640
B57153S0100M051	NTC Thermistor	1	0.476
BLM21SP102BH1D	Ferrite Bead	2	0.237
C0603C104K5RACAUTO	100nF	18	0.106
C0603C105M8PACTU	1uF	1	0.222
C0603C180J5GACAUTO	18pF	2	0.090
C0603C475K8PACTU	4.7uF	1	0.140
C0603X103F3GACTU	10nF	1	3.000
C0805C225K8RACAUTO	2.2uF	1	0.238
C2012X5R1C226K125AC	22uF	2	0.542
CRCW06031K00FKEA	1k	4	0.031
CRCW06032K20FKEA	2k2	2	0.039
CRCW06032R20FKEA	2R2	1	0.030
CRCW060310K0FKEA	10k	5	0.028
CRCW060356K2FKEA	56k2	1	0.040

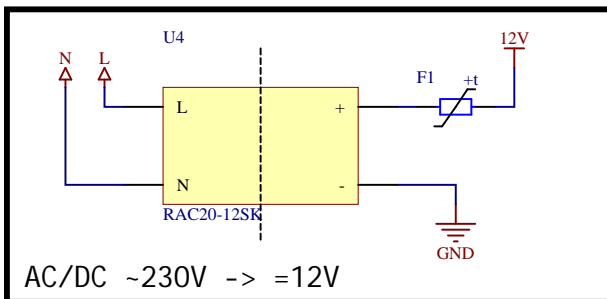
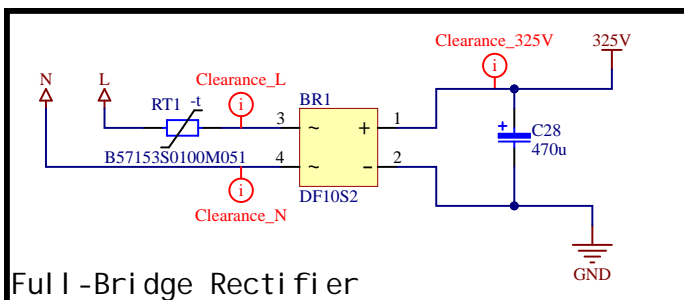
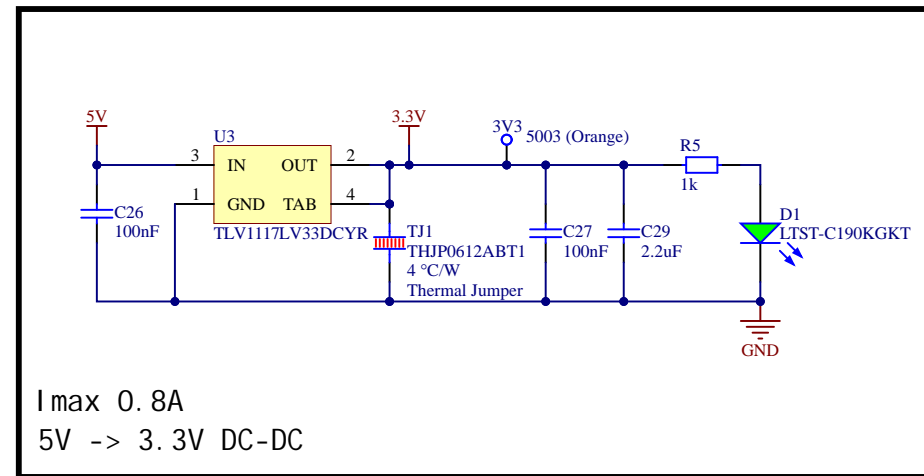
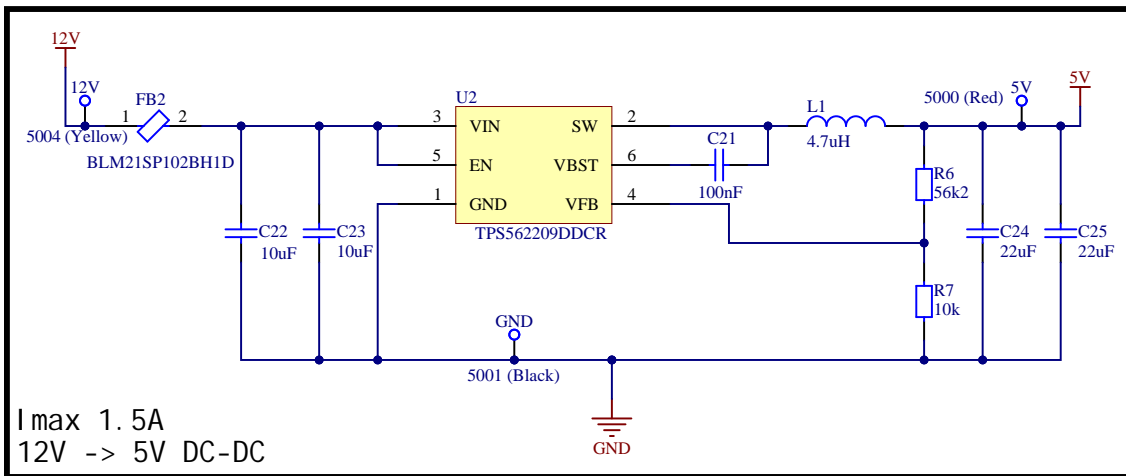
Tab. B.2: Pokračovanie zoznamu použitých súčiastok v návrhu DPS riadiaceho modulu


Názov	Popis	Množstvo [-]	Cena [€/ks]
DF10S2	Bridge Rectifier	1	0.509
DG409LEDQ-GE3	Differential Multiplexer	2	1.540
ESMR401VSN471MR35S	470uF	1	4.340
GRM21BR61E106KA73L	10uF	3	0.328
GRM188R6YA225KA12D	2.2uF	2	0.164
LTST-C190KGKT	Green LED	1	0.123
LTST-C190KRKT	Red LED	1	0.205
LTST-C190KSKT	Yellow LED	1	0.213
PMV37ENEAR	N-Channel MOSFET	1	0.287
RAC20-12SK	AC/DC	1	10.460
Resettable Fuse	Resettable Fuse	1	0.229
STM32F413ZHT6	MCU	1	11.560
560020-0820	8-pim	1	1.100
TC652AGVUA	FAN Driver	1	1.550
THJP0612ABT1	Thermal Jumper 0612	1	0.686
TLV1117LV33DCYR	Voltage refulator	1	0.961
TPS562209DDCR	Switching Regulator	1	0.661
XAL5030-472MEB	4.7uH	1	1.440
Suma		69.88€	

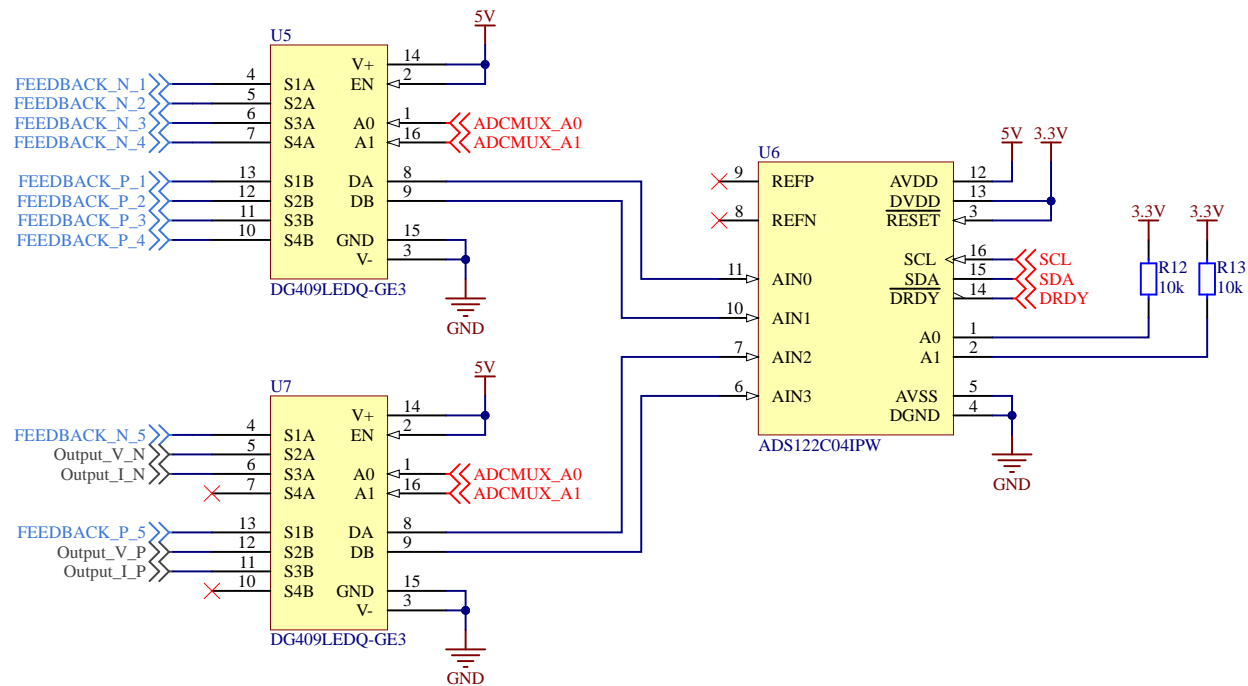



Title: MCU		VUT - TU Brno Racing Technická 2896/2, Brno Czech Republic	
Project: HV_PSU_ControlModule		Drawn by: Samuel Ščipa	Checked by: -
Car: -	Date: 22-May-21	Contact: scipa@tubnracing.cz	
Sheet 1/4	Rev. -		



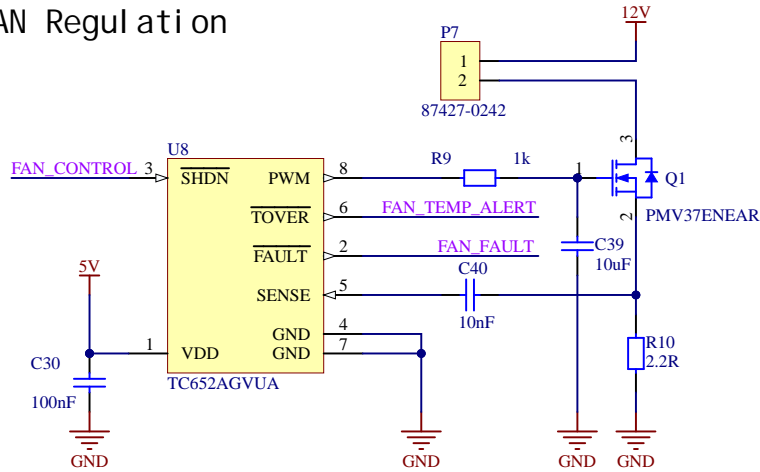


Title: Power_Delivery			VUT - TU Brno Racing Technická 2896/2, Brno Czech Republic			
Project: HV_PSU_ControlModule			Drawn by: Samuel Ščipa			Checked by: -
Car: -		Date: 22-May-21				
Sheet 2/4		Rev. A Format A4				
Contact: scipa@tubnoracing.cz						

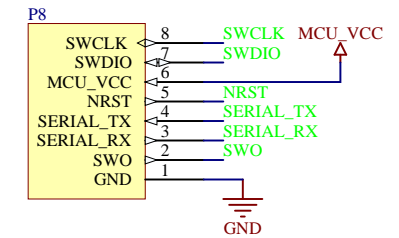
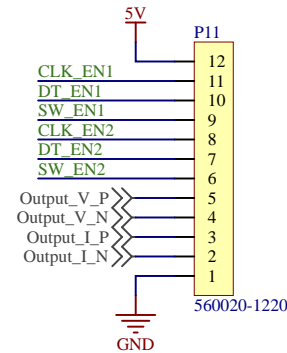


Title: ADC				VUT - TU Brno Racing Technická 2896/2, Brno Czech Republic		
Project: HV_PSU_ControlBoard			Drawn by: Samuel Ščipa		Checked by: -	
Car: -		Date: 22-May-21		Contact: scipa@tubrnoracing.cz		
Sheet 3/4		Rev. A Format A4				

FAN Regulation

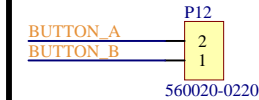


ENCODERS 1, 2, 3

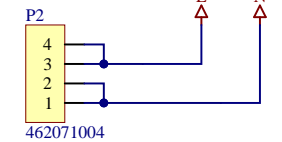


Programming header

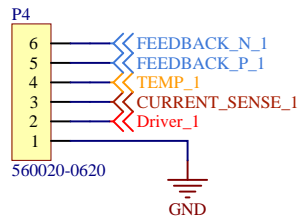
OUTPUT BUTTON



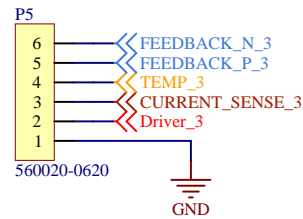
~230V@50Hz



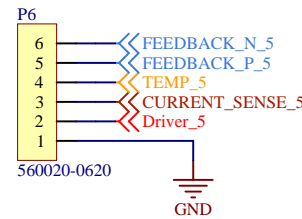
Data connector, MODULE - 1



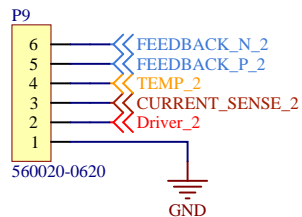
Data connector, MODULE - 3



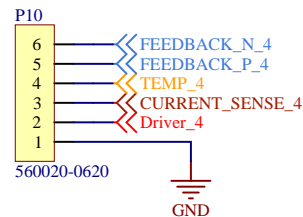
Data connector, MODULE - 5



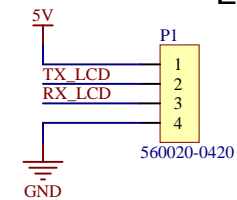
Data connector, MODULE - 2



Data connector, MODULE - 4

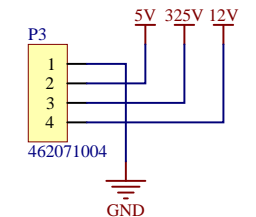


LCD




LCD - 3.5", 480x320
NX4832T035
komunikacia cez uart

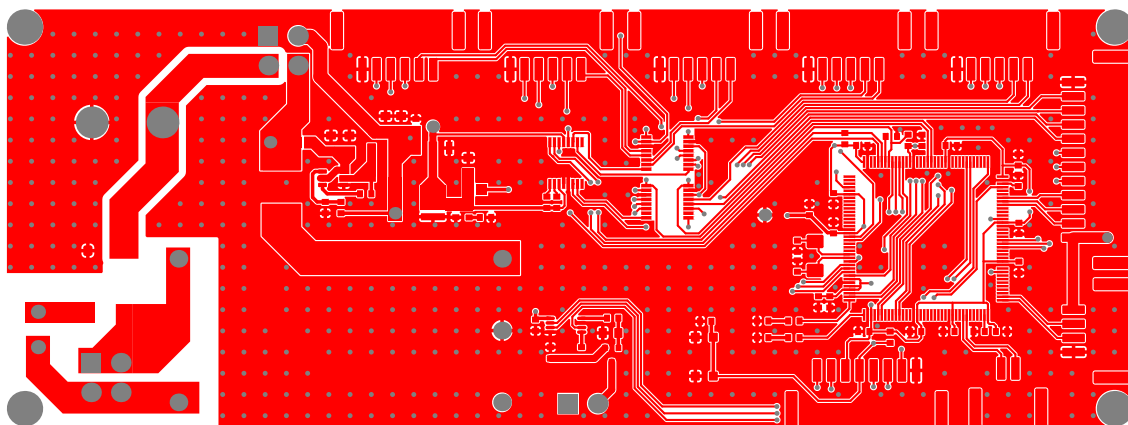
Control Board connector



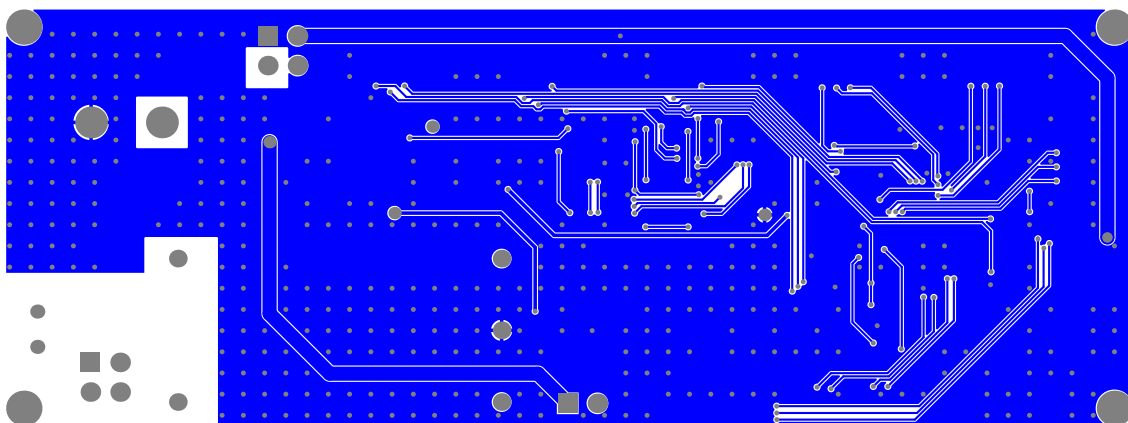
Power delivery header,
solder on 1 module

Title:			Connectors			VUT - TU Brno Racing Technicka 2896/2, Brno Czech Republic					
Project:			HV_PSU_ControlModule			Drawn by:		Checked by:			
Car:			-			Samuel Ščipa		-			
Date:			22-May-21			Contact: scipa@tubnoracing.cz					
Sheet			4/4								
Rev.			A			Format			A4		





Obr. B.1: Pohľad na hornú vrstvu riadiaceho modulu

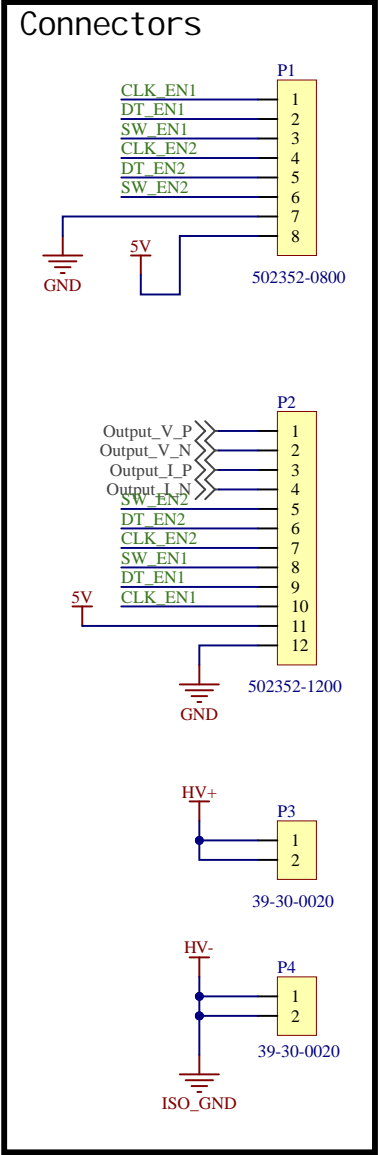
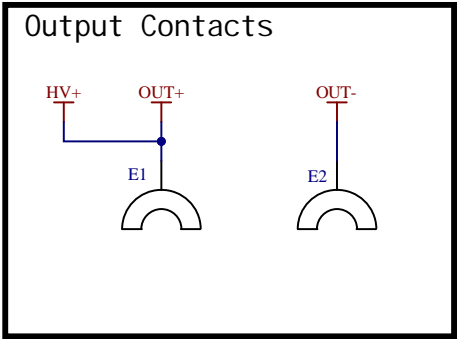
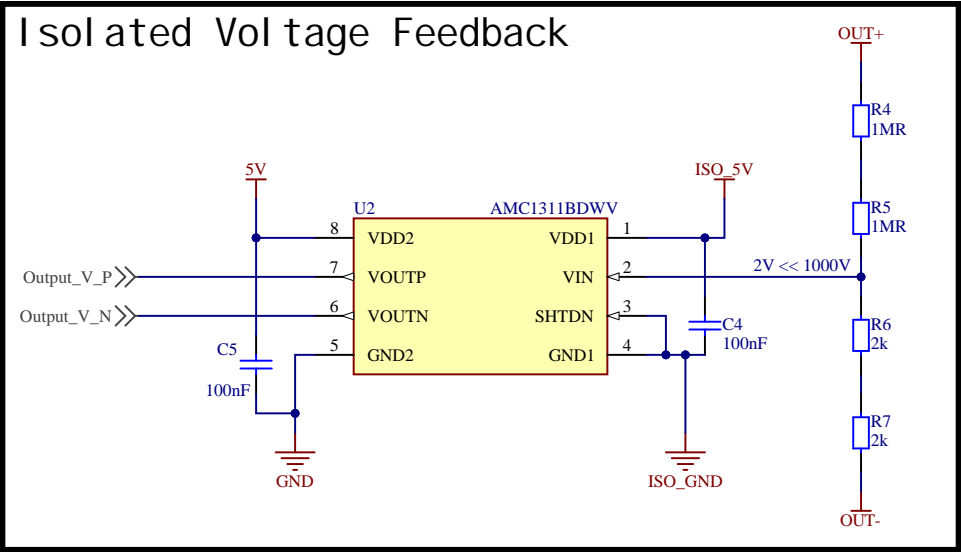
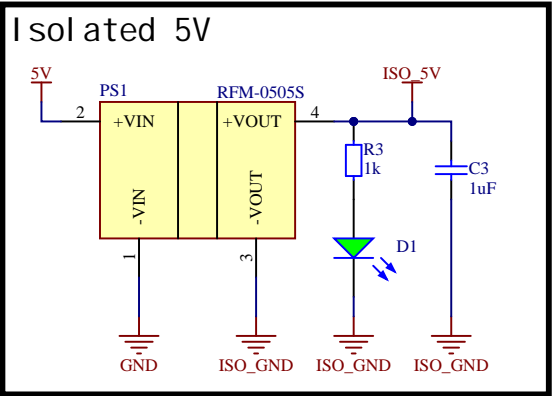
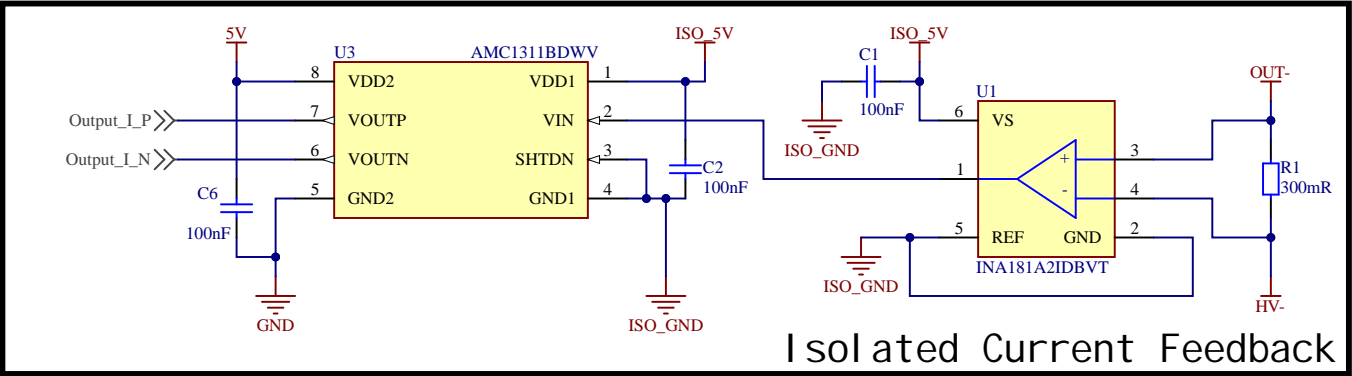



Obr. B.2: Pohľad na spodnú vrstvu riadiaceho modulu

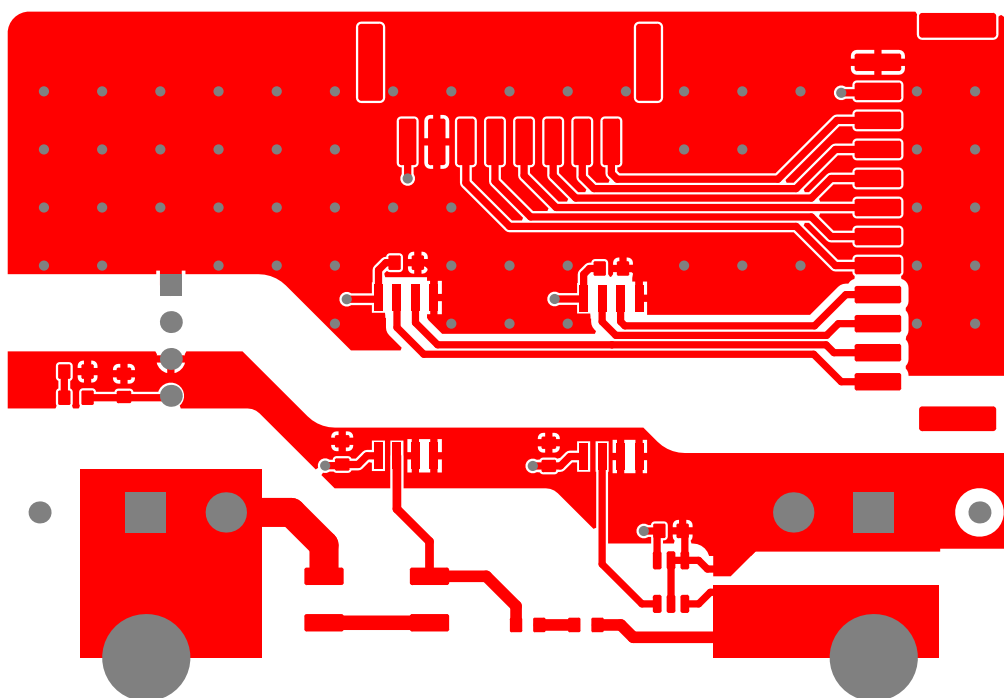
C Výstupný modul

Tab. C.1: Zoznam použitých súčiastok v návrhu DPS výstupného modulu

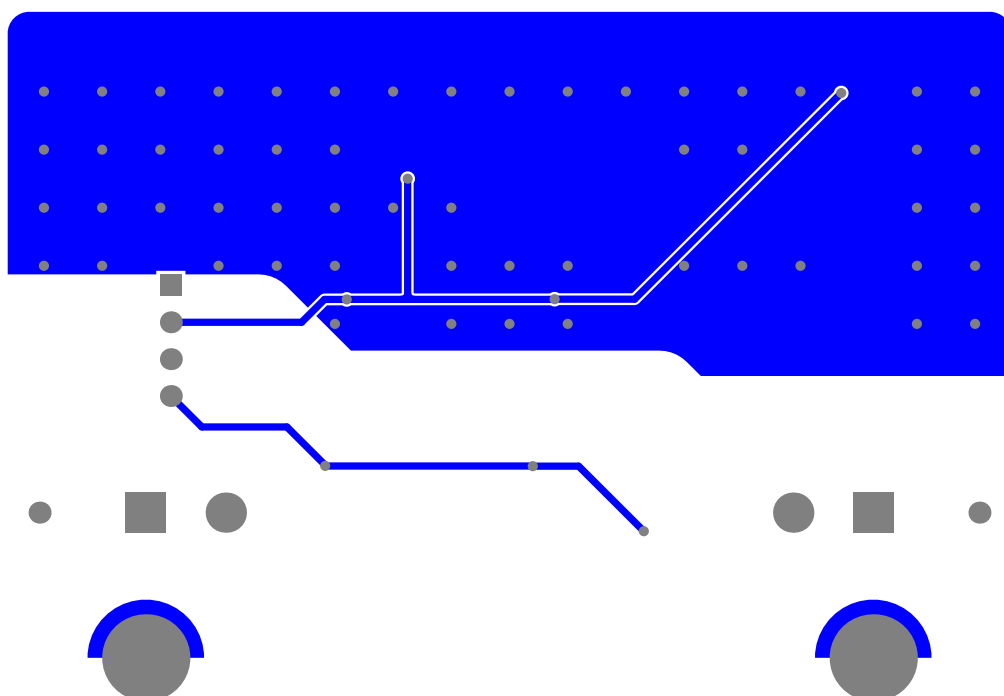
Názov	Popis	Množstvo [-]	Cena [€]
C0603C104K5RACAUTO	100nF	5	0.11
C0603C105M8PACTU	1uF	1	0.22
LTST-C190KGKT	Green LED	1	0.11
502352-0800	8-pin,	1	1.43
502352-1200	12-pin	1	0.94
39-30-0020	2-pin	2	0.56
RFM-0505S	DC/DC	1	1.22
ERJ3RQFR30V	300mR	1	0.23
CRCW06031K00FKEA	1k	1	0.08
KTR25JZPF1004	1Mohm	2	0.34
ERA-3VEB2001V	2k	2	0.44
INA181A2IDBVT	OP Amp	1	0.44
AMC1311BDWV	Isolated OP Amp	2	7.20
Suma		22.29€	



Title: Main				VUT - TU Brno Racing Technicka 2896/2, Brno Czech Republic		
Project: HV_PSU_OutputModule			Drawn by: Samuel Ščipa		Checked by: -	
Car: -	Date: 20-May-21		Contact: scipa@tubrnoracing.cz			
Sheet 1/1	Rev. A	Format A4				



Obr. C.1: Pohľad na hornú vrstvu výstupného modulu



Obr. C.2: Pohľad na spodnú vrstvu výstupného modulu